



DOFEBD

DOĞU FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

JOURNAL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF EAST

Cilt / Volume

9

Sayı / Issue

1

Yıl / Year

2026



**HAKKARİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOĞU FEN BİLİMLERİ
DERGİSİ**



Yılda 2 kez yayımlanır.

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/dfbd>

dofebd@hakkari.edu.tr

Sahibi

Prof. Dr. Musa GENÇCELEP
Rektör

Bilimsel Yayın Koordinatörü

Doç. Dr. Halil Emre DENİŞ
halilemredenise@hakkari.edu.tr

Baş Editör

Dr. Öğr. Üyesi Metin ERTAŞ
metinertas@hakkari.edu.tr

Yönetici Editör

Dr. Öğr. Üyesi Erkan AZİZOĞLU
erkanazizoglu@hakkari.edu.tr

Yardımcı Editör

Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN
tayfuncetin@hakkari.edu.tr

Mizanpaıcı

Dr. Öğr. Üyesi Metin ERTAŞ

Editör Kurulu

Prof. Dr. Can YILMAZ
Prof. Dr. Hakan GÜNDOĞMUŞ
Prof. Dr. Şevket ŞİMŞEK
Doç. Dr. Mehmet Macit ERTUŞ
Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN

Prof. Dr. Mehmet Sait TAYLAN
Prof. Dr. Cemal ULUTAŞ
Doç. Dr. Melek ERDEK
Dr. Öğr. Üyesi Erkan AZİZOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Metin ERTAŞ

Alan Editörleri

Prof. Dr. Şevket ŞİMŞEK
Prof. Dr. Hakan GÜNDOĞMUŞ
Prof. Dr. Abdulahad DOĞAN
Doç. Dr. Selçuk EŞSİZ
Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Erkan AZİZOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Tayfun ÇETİN

Doç. Dr. Melek ERDEK
Doç. Dr. Hazal YÜKSEKKAYA
Dr. Öğr. Üyesi Şengal BAĞCI TAYLAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet YURDERİ
Dr. Öğr. Mustafa Emre AKÇAY
Dr. Öğr. Üyesi Erşan Ömer YÜZER
Doç. Dr. Muzaffer MÜKEMRE

Sekreter

Sevgi Pınar ZEYDAN

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1-9	Prevalence of <i>Giardia duodenalis</i> in Stray and Shelter Dogs of Van and Molecular Characterization of Isolates Based on β-<i>Giardin</i> Gene Phylogenetic Analysis / Research Article <i>Van'daki Sokak ve Barmak Köpeklerinde Giardia duodenalis Yaygınlığı ve İzolatların β-Giardin Gen Filogenetik Analizine Dayalı Moleküler Karakterizasyonu / Araştırma makalesi</i> Ali Bilgin Yılmaz
10-18	Prevalence and Molecular Analysis of the Metacystode Stage (<i>Cysticercus tenuicollis</i>) of <i>Taenia hydatigena</i> in Sheep / Research Article <i>Koyunlarda Taenia hydatigena'nın Metasesod Evresi'nin (Cysticercus tenuicollis) Prevalansı ve Moleküler Analizi / Araştırma makalesi</i> Ali Bilgin Yılmaz*, Özge Oktay Ayan
19-38	Enhanced Photoresponse and Antibacterial Performance of Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al Hybrid Bio-Nanocomposite / Araştırma Makalesi <i>Au/Jelatin:Ag NP/p-Si/Al Hibrit Biyo-Nanokompozit Fotodiyotun Geliştirilmiş Foto tepkisi ve Antibakteriyel Performansı / Research Article</i> Gökhan Gök and Ali Rıza Deniz*
39-54	Multi-Input AND Gate for Physical Measurement and Triggering / Research Article <i>Fiziksel Ölçüm ve Tetikleme için Çok Girişli VE Kapısı / Araştırma makalesi</i> Emine Canan Günay Demirel
55-73	Seasonal Temperature Change in the Eastern Anatolia Region During 1950-2025 Based on ERA5 Data / Research Article <i>ERA5 Verileriyle Doğu Anadolu Bölgesi'nde 1950-2025 Döneminde Sıcaklığın Mevsimsel Değişimi / Araştırma makalesi</i> Ertuğrul GÜL
74-94	FDM Yöntemi ile Üretilen PLA Malzemesinin Üretim Parametrelerinin Yüzey Kalitesi, Geometrik Toleranslar ve Sertlik Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Optimizasyonu / Research Article <i>Experimental Investigation and Optimization of the Effects of Manufacturing Parameters on Surface Quality, Geometric Tolerances, and Hardness of PLA Material Produced by FDM Method / Araştırma makalesi</i> Adem ŞAHİN*, Kaan Süleyman UZ, Fulya CEMALOĞLU

Prevalence of *Giardia duodenalis* in Stray and Shelter Dogs of Van and Molecular Characterization of Isolates Based on β -*Giardin* Gene Phylogenetic Analysis

Ali Bilgin Yılmaz

¹Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Health, Van, Türkiye
email:alibilginyilmaz@yyu.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1885124

Geliş tarihi/Received: 09/02/2026

Kabul tarihi/Accepted:07/04/2026

Abstract

Giardia duodenalis is an intestinal protozoan that affects a wide range of vertebrate hosts, including humans and dogs. This study aimed to investigate the prevalence of *G. duodenalis* in stray and shelter dogs in Van province, Turkey. Following DNA isolation from collected samples, the β -*giardin* gene region was amplified using the polymerase chain reaction (PCR) method. The infection rate was found to be 7.23% in shelter dogs and 28.20% in stray dogs. According to sequence analysis of the β -*giardin* gene, six (18.18%) isolates belonged to assemblage B, 10 (30.30%) to assemblage C, 14 (42.42%) to assemblage D, and three (9.09%) to assemblage E. The infection rate was significantly higher in stray dogs compared to shelter dogs (*p* < .001, OR = 5.04). The infection rate in dogs older than 2 years was 21.21% (14/66), while it was 11.58% (19/164) in dogs younger than 2 years; this difference was not statistically significant (*p* > .05, OR = 2.05). The infection rate in females was 17.35% (21/127), whereas in males, it was 11.65% (12/103), and the difference between sexes was not statistically significant (*p* > .05). The infection rate in dogs with diarrhea was 25.89% (29/112), while in non-diarrheic dogs, it was 3.38% (4/118). The infection rate was significantly higher in dogs with diarrhea compared to non-diarrheic dogs (*p* < .001, OR = 9.96). This study represents the first report of an isolate belonging to the zoonotic assemblage B group in dogs from Van province.

Keywords: *Giardia duodenalis*, dog, β -*giardin*, Turkey, Van

Van'daki Sokak ve Barınak Köpeklerinde *Giardia duodenalis* Yaygınlığı ve İzolatların β -*Giardin* Gen Filogenetik Analizine Dayalı Moleküler Karakterizasyonu

Özet

Giardia duodenalis, insanlar ve köpekler dahil olmak üzere çok çeşitli omurgalı konakçıları etkileyen bir bağırsak protozoonudur. Bu çalışma, Türkiye'nin Van ilindeki sokak ve barınak köpeklerinde *G. duodenalis* yaygınlığını araştırmayı amaçlamıştır. Toplanan örneklerden DNA izolasyonunu takiben, β -*giardin* gen bölgesi polimeraz zincir reaksiyonu (PZR) yöntemi ile çoğaltılmıştır. Enfeksiyon oranı barınak köpeklerinde %7.23, sokak köpeklerinde ise %28.20 olarak bulunmuştur. β -*giardin* geninin dizi analizine göre, altı (%18.18) izolat B grubuna, on (%30.30) izolat C grubuna, on dört (%42.42) izolat D grubuna ve üç (%9.09) izolat E grubuna aittir. Enfeksiyon oranı, barınak köpekleriyle karşılaştırıldığında sokak köpeklerinde istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek bulunmuştur (*p* < .001, OR = 5.04). İki yaşından büyük köpeklerde enfeksiyon oranı %21.21 (14/66) iken, iki yaşından küçük köpeklerde %11.58 (19/164) idi; bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildi (*p* > .05, OR = 2.05). Dişilerde enfeksiyon oranı %17.35 (21/127) iken, erkeklerde %11.65 (12/103) idi ve cinsiyetler arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı değildi (*p* > .05). İshalli köpeklerde enfeksiyon oranı %25.89 (29/112) iken, ishali olmayan köpeklerde %3.38 (4/118) idi. İshalli köpeklerdeki enfeksiyon oranı, ishali olmayanlara kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksekti (*p* < .001, OR = 9.96). Bu çalışma, Van ilindeki köpeklerde zoonotik B grubuna ait bir izolatın ilk raporunu temsil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Giardia duodenalis*, Köpek, β -*giardin*, Türkiye, Van

Introduction

Giardia duodenalis is a prevalent protozoan parasite that causes gastrointestinal disease in a broad range of hosts, including humans, domestic animals, and wildlife (Adell-Aledón et al., 2018). *G. duodenalis* is one of the most frequently detected pathogens associated with diarrhea in humans and animals, including domestic dogs. As in other hosts affected by this parasite, infections in dogs can be acute, chronic, or asymptomatic (Ballweber et al., 2010; Westermarck, 2016). Understanding the global distribution and zoonotic potential of *G. duodenalis*, as well as its prevalence and genetic diversity in different animal populations, is crucial for both public and animal health (Velante et al., 2017). Free-roaming dog populations, in particular, can act as reservoirs for various infectious diseases, including parasitic infections (Do et al., 2021). Due to the lack of adequate veterinary care and hygiene, these animals can harbor parasites, posing a risk to both animal and human health (De Waal et al., 2022). The high prevalence of *G. duodenalis* observed in wildlife-adapted hosts represents a significant risk for the spillover of this pathogen into stray dog populations. This ecological dynamic facilitates parasite transmission from forested areas to domestic animal communities, with the potential to negatively impact both livestock and human health (Hatam-Nahavandi et al., 2025).

The diagnostic methods used to determine the prevalence of giardiasis are of paramount importance. The limitations of microscopic and antigen-based tests in detecting low-intensity infections often result in underestimated prevalence rates. In contrast, PCR-based molecular methods targeting genes such as β -*giardin*, glutamate dehydrogenase, and triosephosphate isomerase exhibit higher sensitivity. By providing higher detection rates, these methods enhance the reliability of epidemiological studies. Recent data from molecular studies indicate that the use of molecular techniques for the detection of *G. duodenalis* provides more accurate, higher prevalence rates and offers advantages for characterization at the assemblage level (Kalavani et al., 2024).

According to previous studies, *G. duodenalis* has been classified into eight distinct assemblages or genotypes, designated A through H. Among these, assemblages A and B infect humans and animals worldwide. Assemblage C and D are found in dogs, assemblage E in ruminants including livestock, assemblage F in cats, assemblage G in rodents, and assemblage H in marine mammals. However, recent observations have challenged this grouping, as infections in humans caused by assemblages C, D, E, F, and G have been reported (Fantinatti et al., 2016; Garcia-R et al., 2021).

The detection of the zoonotic sub-assemblages A and B in dog populations, coupled with the finding of the dog-adapted assemblages C and D in humans, raises the question of whether dogs play a role in the transmission of *G. duodenalis* infection to humans (Ballweber et al., 2010).

Therefore, this study aimed to determine the prevalence, identify the assemblages, and perform molecular characterization of *G. duodenalis* in fecal samples from shelter and stray dogs in Van province, Türkiye, to contribute data on its zoonotic potential in this region.

Materials and Methods

Study Area and Samples

This study was conducted in Van province, located in the Eastern Anatolia Region of Türkiye, between January and June 2025. A total of 230 mixed-breed dogs of different sexes were examined. The sample comprised 152 dogs (83 male, 69 female) from the Van Metropolitan Municipality shelter and 78 stray dogs (37 male, 41 female).

Molecular Analysis and Nested PCR

Fecal samples transported to the laboratory under cold-chain conditions were stored at -20°C until DNA isolation. DNA extraction from the fecal samples was performed using the QIAamp DNA Stool Mini Kit (Qiagen, Germany), following the manufacturer's protocol. Amplification of a 753 bp region of the β -*giardin* gene was carried out using the G7 F (5'-AAGCCCGACGACCTCACCCGCACTGC-3') and G759R (5'-GAGGCCCGCCCTGGATCTTCGAGACGAC-3') primers (Cacciò & Ryan, 2008). The master mix was prepared in a final volume of 25 µL, containing 1.5 mM MgCl₂, 10 pmol each of forward and reverse primers, 200 µM dNTPs, 10X PCR buffer, 1U Taq Polymerase, nuclease-free water, and 100 ng of DNA. The reaction conditions were as follows: initial denaturation at 95°C for 15 min, followed by 35 cycles of denaturation at 95°C for 30 s, annealing at 60°C for 30 s, and extension at 72°C for 1 min, with a final extension at 72°C for 7 min.

For the second step of the nested PCR, amplification of a 511 bp β -*giardin* gene region was performed using the BG1F (5'-GAACGAGATCGAGGTCCG-3') and BG2R (5'-CTCGACGAGTTCGTGTT-3') primers (Lalle et al., 2005). The master mix composition and final volume were identical to the first PCR. The reaction conditions were: initial denaturation at 95°C for 15 min, followed by 35 cycles of denaturation at 95°C for 30 s, annealing at 55°C for 30 s, and extension at 72°C for 1 min, with a final extension at 72°C for 7 min.

The obtained PCR products were stained with RedSafe™ Nucleic Acid Staining solution (iNtRON Biotechnology, Korea) solution and visualized on a 1.5% agarose gel electrophoresis system.

Ethical Statement

Ethical approval for this study was obtained from the Van Yüzüncü Yıl University Animal Experiments Local Ethics Committee (protocol number: 20230106).

DNA Sequencing and Phylogenetic Analysis

Purified nested PCR products from all samples were sequenced bidirectionally (forward and reverse) using an ABI 3100 Genetic Analyzer platform by the BM Labosis (Ankara, Türkiye). DNA sequences were aligned using CodonCode Aligner software, and consensus sequences were generated using ClustalW within the BioEdit Sequence Alignment Editor (Higgins et al., 1996; Hall, 1999). Phylogenetic analysis of *G. duodenalis* was performed based on the β -*giardin* locus, incorporating additional reference isolates from GenBank. Phylogenetic trees were constructed using MEGA 12

software (Kumar et al., 2024). The Model Test feature within MEGA 12 was used to determine the best-fit model, and the Tamura 3+I model (Tamura, 1992) was selected for maximum likelihood (ML) analyses. The reliability of the results was assessed with 1000 bootstrap replicates. Finally, the maximum likelihood method was used to construct the evolutionary tree. *Giardia muris* (MK675656.1) was used as an outgroup (Figure 1).

Statistical Analysis

The association between potential risk factors and *G. duodenalis* infection in dogs was analyzed using the Chi-square test. Prevalence rates were presented with a 95% confidence interval (CI), and odds ratios (OR) were calculated. A probability value of $*p* < .05$ was considered statistically significant.

Results

This study included 230 dogs (127 female, 103 male). All dogs were of mixed breed. The mean $\pm$ standard deviation (*SD*) age of the dogs was 3.0 ± 2.7 years. Dogs were divided into two groups: those under 2 years of age and those over 2 years of age. The mean $\pm$ *SD* age was 1.53 ± 0.50 years for dogs under 2 years ($*n* = 164$) and 6.6 ± 2.3 years for dogs over 2 years ($*n* = 66$). The sex distribution was 103 males (44.8%) and 127 females (55.2%). Of the 230 fecal samples examined, 112 (48.7%) were from dogs with diarrhea and 118 (51.3%) were from non-diarrheic dogs.

The infection rate was 7.23% in shelter dogs and 28.20% in stray dogs. The infection rate was significantly higher in stray dogs compared to shelter dogs ($*p* < .001$, OR = 5.04). The infection rate was 21.21% (14/66) in dogs over 2 years old and 11.58% (19/164) in dogs under 2 years old; this difference was not statistically significant ($*p* > .05$, OR = 2.05). The infection rate was 16.53% (21/127) in females and 11.65% (12/103) in males, with no statistically significant difference between sexes ($*p* > .05$). The infection rate was 25.89% (29/112) in dogs with diarrhea and 3.38% (4/118) in non-diarrheic dogs. The infection rate was significantly higher in dogs with diarrhea compared to those without ($*p* < .001$, OR = 9.96) (Table 1).

Table 1. BLAST comparison results of the obtained sequences with reference sequences in GenBank

GenBank Accession Number / Sample No	Closest GenBank Reference Sequence(s)	Assemblage	Similarity (%)
PP918965 / 6	KT948084	B	99.40
PP918966 / 10	LC508615, LC436571, MG746614	B	99.80
PP918967 / 11	JN416552, KT728458	C	99.80
PP918964 / 32	KT922250, KT922248	E	99.80
PP918968 / 77	LC437432	C	99.60
PP918969 / 92	LC437453	D	99.80

In this study, assemblages B, C, and D were identified in shelter dogs, while assemblages C and E were found in stray dogs. Of the 33 positive samples, six (18.18%) belonged to assemblage B, 10 (30.30%) to assemblage C, 14 (42.42%) to

assemblage D, and three (9.09%) to assemblage E. Due to the high sequence similarity within assemblages, one representative sequence from each of the six distinct genotypes was submitted to GenBank.

In the homology analysis, the *G. duodenalis* assemblage C isolates obtained in this study (GenBank accession numbers PX673978.1 and PX673974.1) showed 100% similarity with the isolate ON088471.1 from dogs in the Czech Republic. The *G. duodenalis* assemblage B isolates (PX673977.1 and PX673973.1) showed 100% similarity with isolate MW679441.1 from humans in Brazil. The *G. duodenalis* assemblage D isolate (PX673976.1) showed 100% similarity with isolate LC437453.1 from dogs in Japan. The *G. duodenalis* assemblage E isolate (PX673975.1) showed 100% similarity with isolate MH230881.1 from yaks in China (Figure 1).

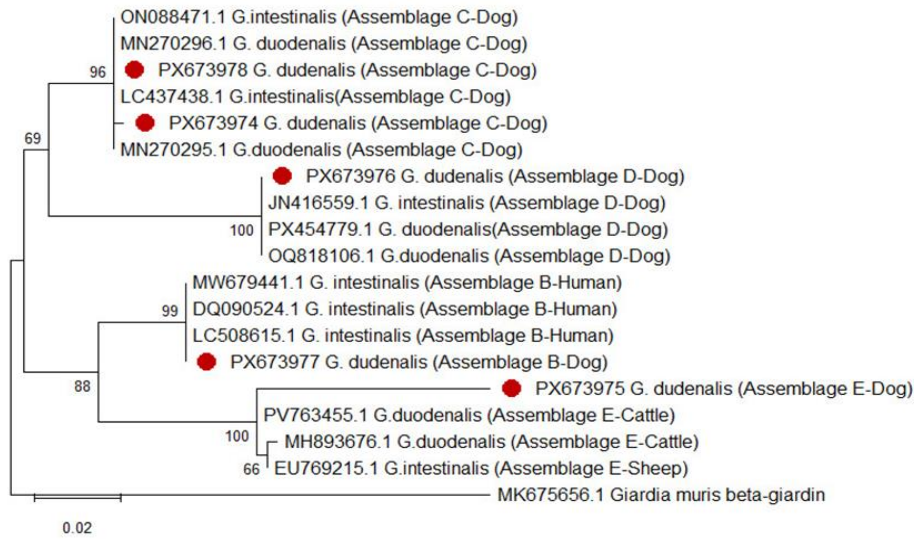


Figure 1. The phylogenetic relationships among *G. duodenalis* isolates collected from dogs and cats were inferred using the neighbor-joining method based on the β -giardin gene sequences under the Kimura 2-parameter model. Bootstrap values are shown at the nodes of the tree. Reference sequences retrieved from GenBank together with their accession numbers are indicated. The *Giardia muris* sequence was used as the outgroup.

Discussion

The widespread zoonotic intestinal parasite *G. duodenalis* infects a variety of mammals worldwide, including dogs, causing giardiasis (Claerebout et al., 2009). Molecular-based studies on *G. duodenalis* diagnosis in dogs globally report a prevalence ranging from 1.9% to 33.8%, with the detection of assemblages A, B, C, D, and E (Claerebout et al., 2009; Solarczyk & Majewska, 2010; Itoh et al., 2011; E. Silva et al., 2012; Shin et al., 2015; Kim et al., 2019; Pereira et al., 2021). Studies conducted in various provinces of Türkiye using molecular techniques have reported a *G. duodenalis* prevalence of 1% to 9% in dogs, with assemblages A, B, C, D, and E identified (Gultekin et al., 2017; Aslan Çelik et al., 2023; Ertaş Oğuz et al., 2023; Aslan Çelik et al., 2024; Satasmaz et al., 2025). In their study, Claerebout et al. (2009) reported a *G. duodenalis* infection rate of 9.3% in stray dogs, 43.9% in shelter dogs, and 18.1% in diarrheic dogs. They also reported that across the entire dog population, dogs under 2 years of age were more frequently infected with *G. duodenalis* than adult dogs.

A study conducted on shelter dogs in Batman province, Türkiye, reported the presence of assemblages C and D in two puppies under 1 year of age (Aslan Çelik et al., 2023). In our study, the infection rate was 7.23% in shelter dogs and 28.20% in stray dogs, and this difference was statistically significant ($*p < .001$). Stray dogs had a five-fold higher probability of infection than shelter dogs. The lower prevalence in shelter dogs may be attributed to regular veterinary care and the use of anthelmintics, although these measures appear insufficient to prevent the infection completely. In our study, the infection rate was 11.58% in dogs under 2 years and 21.21% in dogs over 2 years. The >2 years age group showed a 2.05-fold higher odds of infection than the ≤ 2 years group, although this difference was not statistically significant ($*p > .05$). This suggests a potential age-related increase in risk that the study may have been underpowered to detect. Age grouping was based on immune system development and behavioral risk factors in dogs. The literature reports that young dogs (≤ 2 years old) are more susceptible to parasitic infections due to both immunological immaturity and their tendency to explore the environment orally (Claerebout et al., 2009). Therefore, age groups were classified as ≤ 2 years and >2 years.

In our study, the infection rate was 25.89% in diarrheic dogs and 3.38% in non-diarrheic dogs, a statistically significant difference ($*p < .001$). These findings suggest that diarrhea in these dogs may be associated with *G. duodenalis* infection. According to the statistical analysis results, the presence of diarrhea (OR = 9.96) and living on the streets (OR = 5.04) were identified as significant risk factors. The finding that the probability of infection is approximately 10 times higher in dogs with diarrhea and 5 times higher in stray dogs indicates that both clinical findings and environmental exposure are important determinants in giardiasis. For age (>2 years, OR = 2.05) and gender (female, OR = 0.67), non-significant risk variations with potential epidemiological relevance were observed. For instance, the twofold increase in risk in the >2 years age group may be associated with cumulative exposure.

Adell-Aledón et al. (2018) in their study, reported an overall *G. duodenalis* prevalence of 36.5% in the investigated dog population, with higher infection rates observed in female dogs compared to males, and the presence of assemblages A, B, C, and D in shelter dogs. Similarly, in our study, the infection rate was higher in females (16.53%) than in males (11.65%), although this difference was not statistically significant ($*p > .05$). A coprological study in Iran reported a positivity rate of 4.64% in 323 dog fecal samples (Bakhshani & Razmi, 2025).

Various studies have reported assemblages C and D dog-specific genotypes (Solarczyk & Majewska, 2010; Gultekin et al., 2017). A study in Iran collected 246 fecal samples from 49 stray and 97 shelter dogs, reporting 1.21% assemblage C and 0.83% assemblage D genotypes (Esmailzadeh et al., 2023). In our study, the dog-specific genotypes C (30.30%) and D (42.42%) were found more frequently than other genotypes. intensive contact among dogs living in the same environment.

Abdel-Moein and Saeed (2016), in their study, reported that assemblage E showed 100% similarity with assemblage E obtained from humans, suggesting it may have zoonotic potential. In our study, assemblage E was detected in dogs at a rate of 9.09%. This molecular finding indicates the potential for transmission of assemblage E from ruminants to dogs and subsequently from dogs to humans. In Türkiye, Ertuğ et al. (2016) reported the detection of assemblage B in humans. A subsequent study in the same province found a high rate (100%) of assemblage B in dogs (Gultekin et al., 2017). In our study, assemblage B was detected in shelter dogs at a rate of 18.18%.

Given the zoonotic nature of assemblage B, this suggests that dogs could act as reservoir hosts, posing a potential risk to human health.

The prevalence of *G. duodenalis* in dogs in this study is consistent with prevalence rates and assemblages reported in molecular studies conducted on dogs in Türkiye, but appears lower than rates reported in studies worldwide. This discrepancy may be attributed to geographical conditions and climatic characteristics of the region. In conclusion, alongside technological advancements, new diagnostic methods have emerged for the detection of *G. duodenalis*. The molecular prevalence and genetic characterization of *G. duodenalis* in stray and shelter dogs in Van province have been elucidated. This study also represents the first report of an isolate belonging to the zoonotic assemblage B group in dogs from Van. In this context, the study provides novel data to the existing literature and highlights the potential risk dogs may pose for human infections.

References

- Abdel-Moein, K. A., & Saeed, H. (2016). The zoonotic potential of *Giardia intestinalis* assemblage E in rural settings. *Parasitology Research*, 115(8), 3197–3202. doi:10.1007/s00436-016-5081-7
- Adell-Aledón, M., Köster, P. C., De Lucio, A., Puente, P., de Mingo, M. H., ... Carmena, D. (2018). Occurrence and molecular epidemiology of *Giardia duodenalis* infection in dog populations in eastern Spain. *BMC Veterinary Research*, 14(1), 26. doi:10.1186/s12917-018-1353-z
- Aslan Çelik, B., Celik, O., Kochan, A., & Simsek, S. (2023). Prevalence and genotypes of *Giardia duodenalis* in shelter dogs in Southeastern Turkey. *Veterinary Research Forum*, 14(11), 595–600. doi:10.30466/vrf.2023.1998950.3826
- Aslan Çelik, B., Yılmaz, R., Çiftçi, T., Karademir, G. K., & İnci, A. (2024). A survey of the prevalence and genotypes of *Cryptosporidium* spp. and *Giardia duodenalis* in shelter dogs in Batman, Turkey. *Bulgarian Journal of Veterinary Medicine*, 27(4), 632–638. doi:10.15547/bjvm.2023-0042
- Bakhshani, A., & Razmi, G. (2025). Gastrointestinal parasites in shelter dogs in Khorasan Razavi province, Iran: Prevalence and mini review in Iran and some neighboring countries. *Veterinary Research Forum*, 16(8), 447–454. doi:10.30466/vrf.2024.2037586.4391
- Ballweber, L. R., Xiao, L., Bowman, D. D., Kahn, G., & Cama, V. A. (2010). Giardiasis in dogs and cats: Update on epidemiology and public health significance. *Trends in Parasitology*, 26(4), 180–189. doi:10.1016/j.pt.2010.02.005
- Cacciò, S. M., & Ryan, U. (2008). Molecular epidemiology of giardiasis. *Molecular and Biochemical Parasitology*, 160(2), 75–80. doi:10.1016/j.molbiopara.2007.12.002
- Claerebout, E., Casaert, S., Dalemans, A. C., De Wilde, N., Levecke, B., Vercruysse, J., & Geurden, T. (2009). *Giardia* and other intestinal parasites in different dog populations in Northern Belgium. *Veterinary Parasitology*, 161(1–2), 41–46. doi:10.1016/j.vetpar.2008.11.024
- De Waal, T., Aungier, S., Lawlor, A., O'Neill, E., O'Neill, R., Zintl, A., & de la Puente, S. (2022). Retrospective survey of dog and cat endoparasites in Ireland: Antigen detection. *Animals*, 13(1), 137. doi:10.3390/ani13010137

- Do, T., Ngasaman, R., Saechan, V., Boonmars, T., Pinniam, N., Thongdee, M., ... Kaewnoi, D. (2021). First molecular detection of *Babesia gibsoni* in stray dogs from Thailand. *Pathogens*, 10(6), 639. doi:10.3390/pathogens10060639
- Ertas Oğuz, F., Ayan, A., & Orunç Kilinç, Ö. (2023). Investigation of the prevalence of *Giardia duodenalis* in dogs in Van region by microscopic and molecular methods. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(3), 2264–2270. doi:10.21597/jist.1276968
- Ertuğ, S., Ertabaklar, H., Özlem Çalışkan, S., Gürüz, Y., & Balcıoğlu, C. (2016). Genotyping of *Giardia intestinalis* strains isolated from humans in Aydın, Turkey. *Mikrobiyoloji Bulteni*, 50(1), 152–158. doi:10.5578/mb.10387
- Esmailzadeh, R., Malekifard, F., Rakhshanpour, A., & Hosseini, H. (2023). Frequency and genotyping of *Giardia duodenalis* in dogs of Urmia, northwest of Iran. *Veterinary Research Forum*, 14(6), 335–339. doi:10.30466/vrf.2022.545726.3336
- E Silva, F. M. P., Monobe, M. M., Lopes, R. S., & Araújo, J. P., Jr. (2012). Molecular characterization of *Giardia duodenalis* in dogs from Brazil. *Parasitology Research*, 110(1), 325–334. doi:10.1007/s00436-011-2492-3
- Fantinatti, M., Bello, A. R., Fernandes, O., & Da-Cruz, A. M. (2016). Identification of *Giardia lamblia* assemblage E in humans points to a new anthroponotic cycle. *The Journal of Infectious Diseases*, 214(8), 1256–1259. doi:10.1093/infdis/jiw361
- Garcia-R, J. C., Ogbuigwe, P., Pita, A. B., & Velathanthiri, N. S. (2021). First report of novel assemblages and mixed infections of *Giardia duodenalis* in human isolates from New Zealand. *Acta Tropica*, 220, 105969. doi:10.1016/j.actatropica.2021.105969
- Gultekin, M., Ural, K., Aysul, N., Bal, M. K., & Aypak, S. (2017). Prevalence and molecular characterization of *Giardia duodenalis* in dogs in Aydın, Turkey. *International Journal of Environmental Health Research*, 27(3), 161–168. doi:10.1080/09603123.2017.1310187
- Hall, T. A. (1999). BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symposium Series*, 41, 95–98.
- Hatam-Nahavandi, K., Mohammad Rahimi, H., Rezaeian, M., Aghazadeh Meshgi, M., Keshavarz, H., Hejazi, S. H., & Sadraei, J. (2025). Detection and molecular characterization of *Blastocystis* sp., *Enterocytozoon bienersi* and *Giardia duodenalis* in asymptomatic animals in southeastern Iran. *Scientific Reports*, 15(1), 6143. doi:10.1038/s41598-025-90608-w
- Higgins, D. G., Thompson, J. D., & Gibson, T. J. (1996). Using CLUSTAL for multiple sequence alignments. *Methods in Enzymology*, 266, 383–402.
- Itoh, N., Itagaki, T., Kawabata, T., & Kono, K. (2011). Prevalence of intestinal parasites and genotyping of *Giardia intestinalis* in pet shop puppies in east Japan. *Veterinary Parasitology*, 176(1), 74–78. doi:10.1016/j.vetpar.2010.10.048
- Kalavani, S., Matin, S., Rahmanian, V., Mousavi, Z., & Gholami, M. (2024). Prevalence of *Giardia duodenalis* among Asian children: A systematic review and meta-analysis. *International Health*, 16(2), 133–143. doi:10.1093/inthealth/ihad037
- Kim, H. Y., Lee, H., Lee, S. H., Seo, M. G., & Choi, K. H. (2019). Multilocus genotyping and risk factor analysis of *Giardia duodenalis* in dogs in Korea. *Acta Tropica*, 199, 105113. doi:10.1016/j.actatropica.2019.105113

- Kumar, S., Stecher, G., Suleski, M., Li, M., Knyaz, C., & Tamura, K. (2024). MEGA12: Molecular Evolutionary Genetic Analysis version 12 for adaptive and green computing. *Molecular Biology and Evolution*, 41(12), msae263. doi:10.1093/molbev/msae263
- Lalle, M., Pozio, E., Capelli, G., Bruschi, F., Crotti, D., & Cacciò, S. M. (2005). Genetic heterogeneity at the β -giardin locus among human and animal isolates of *Giardia duodenalis* and identification of potentially zoonotic subgenotypes. *International Journal for Parasitology*, 35(2), 207–213. doi:10.1016/j.ijpara.2004.10.022
- Pereira, A., Teixeira, J., & Sousa, S. (2021). *Giardia duodenalis* infection in dogs from the metropolitan area of Lisbon, Portugal: Prevalence, genotyping and associated risk factors. *Journal of Parasitic Diseases*, 45(2), 372–379. doi:10.1007/s12639-020-01307-4
- Satasmaz, B., Karademir, G. K., & Çiloğlu, A. (2025). Molecular prevalence and genetic characterization of *Giardia duodenalis* in owned cats and dogs from Nevşehir Province. *Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22(1), 28–35. doi:10.32707/ercivet.1595487
- Shin, J. C., Reyes, A. W. B., Kim, S. H., Kim, S., Yoo, H. S., & Park, S. J. (2015). Molecular detection of *Giardia intestinalis* from stray dogs in animal shelters of Gyeongsangbukdo (Province) and Daejeon, Korea. *The Korean Journal of Parasitology*, 53(4), 477–481. doi:10.3347/kjp.2015.53.4.477
- Solarczyk, P., & Majewska, A. C. (2010). A survey of the prevalence and genotypes of *Giardia duodenalis* infecting household and sheltered dogs. *Parasitology Research*, 106(5), 1015–1019. doi:10.1007/s00436-010-1766-5
- Tamura, K. (1992). Estimation of the number of nucleotide substitutions when there are strong transition-transversion and G+C-content biases. *Molecular Biology and Evolution*, 9(4), 678–687.
- Velante, N. A. P., Oronan, R. B., Reyes, M. F., Villas, R. A., & Tingson, J. A. (2017). *Giardia duodenalis* in captive tigers (*Panthera tigris*), Palawan bearcats (*Arctictis binturong whitei*) and Asian palm civet (*Paradoxurus hermaphroditus*) at a wildlife facility in Manila, Philippines. *Iranian Journal of Parasitology*, 12(3), 348–355.
- Westermarck, E. (2016). Chronic diarrhea in dogs: What do we actually know about it? *Topics in Companion Animal Medicine*, 31(2), 78–84. doi:10.1053/j.tcam.2016.03.001

Prevalence and Molecular Analysis of the Metacystode Stage (*Cysticercus tenuicollis*) of *Taenia hydatigena* in Sheep

Ali Bilgin Yılmaz¹, Özge Oktay Ayan²

¹Van Yüzüncü Yıl University, Faculty of Health, Van, Türkiye

²Van Yüzüncü Yıl University, Institute of Health Sciences, Van, Türkiye

email: alibilginyilmaz@yyu.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1925946

Geliş tarihi/Received: 08/04/2026

Kabul tarihi/Accepted: 27/04/2026

Abstract

This study aimed to determine the prevalence and genetic structure of *Cysticercus tenuicollis* (the larval stage of *Taenia hydatigena*) infection in sheep slaughtered in Van province. A total of 100 sheep slaughtered at the Van Metropolitan Municipality Slaughterhouse between June and December 2025 were examined. Prevalence was evaluated by gender and age group, and phylogenetic analysis was conducted on the mt-CO1 gene region. The findings revealed an overall prevalence of 25.0%. No significant difference was observed between genders (males: 28.1%, females: 23.5%; $p = 0.62$). However, a statistically significant difference was found between age groups (≤ 3 years: 13.3%; > 3 years: 42.5%; $p = 0.001$). Phylogenetic analysis showed that the isolates from this study (GenBank accession numbers PZ006119.1 and PZ006118.1) were 100% identical to cattle isolates from China. These results indicate that *T. hydatigena* has a largely conserved genetic structure worldwide. Compared with the previously reported prevalence of 72.89% in Van in 2001, the current rate of 25% may suggest a decline in infection pressure; however, this difference should be interpreted with caution due to potential variations in study design, sampling strategy, and animal population characteristics. Nevertheless, the high infection rate, particularly in older animals, suggests that the parasite continues to exert pressure on animal health and the local economy. This study emphasizes the importance of parasite management in dogs and proper disposal of slaughterhouse waste to control infection.

Keywords: *Cysticercus tenuicollis*, prevalence, phylogenetic analysis, mt-CO1 gene, *Taenia hydatigena*

Koyunlarda *Taenia hydatigena*'nın Metasestod Evresi'nin (*Cysticercus tenuicollis*) Prevalansı ve Moleküler Analizi

Özet

The skin is a structure that protects the organism from external factors with its multi-layered structure and hair covering. Structures such as hair, feathers, scales, nails, and claws, which are skin extensions protruding from the body surface, contribute to the organism's structure, while skin extensions such as sebaceous glands, sweat glands, and mammary glands, which are distributed throughout the body, confer special physiological functions such as environmental adaptation. Intermediate filaments such as vimentin, desmin, and laminin play important roles in the formation and development of the organism. These IFs have also been reported in many studies as potential markers in tumor formation. Based on the roles of IFs in cell formation and development and their potential use as markers in tumors, in our study, we investigated the expression of vimentin and desmin, which are intermediate filaments, and laminin, which is a connective tissue component, in the skin tissue of adult rats. Our findings showed that these components reacted with varying degrees of intensity in the medulla layer of the hair, some connective tissue cells, the muscle layer of the skin, the retractor muscles of the hair, the medulla of the hair, some blood vessels, and the outer epithelial cells of the hair. As in other mammals, the expression of vimentin, desmin, and laminin in certain cell groups in rat skin indicates that these factors contribute to the cellular skeleton and tissue integrity in the skin.

Anahtar Kelimeler: *Cysticercus tenuicollis*, prevalans, filogenetik analiz, mt-CO1 geni, *Taenia hydatigena*

Introduction

Taenia hydatigena is a parasite that lives as an adult in the small intestines of carnivores. Its larval stage, *Cysticercus tenuicollis*, forms cysts in ruminants and pigs (Yıldırım et al., 2015). These larvae typically appear as fluid-filled cysts in the abdominal, pleural, and pelvic cavities, but can also occur in less common sites such as the lungs, kidneys, and brain (Çelik et al., 2021; Hama et al., 2018). When larvae invade host tissues, they can damage the liver and lungs, sometimes causing severe illness, such as *hepatitis cysticercosa*, or even death in young animals (Bozkurt et al., 2015; Mohammed & Kadir, 2020). As a result, this infection causes major economic losses in livestock, especially because livers and carcasses are often discarded at slaughterhouses (Filip-Hutsch et al., 2019).

Studying the parasite's genetics is essential for understanding how it spreads and adapts over time. The mitochondrial cytochrome c oxidase 1 (mt-CO1) gene is a reliable marker for identifying genetic relationships and phylogenetic patterns among isolates (Çelik et al., 2021). Research shows that *T. hydatigena*'s genetic diversity varies by region (Hama-Soor et al., 2021; Mohammed & Kadir, 2020). These findings help guide the development of more effective control strategies and reduce economic losses (Hama-Soor et al., 2021; Khan et al., 2021). For a more complete picture of the parasite's genetics and to detect differences within the species, it is best to use full mitochondrial genome sequencing and to study other gene regions such as nad5, nad6, and atp6 (Çelik et al., 2021; Jia et al., 2010).

Many studies have examined the prevalence of *C. tenuicollis* in sheep worldwide, showing that infection rates vary widely across locations, animal management practices, and stray dog densities. For example, a study in Egypt found infection rates of 19% in goats (67 cases) and 16% in sheep (80 cases) among 500 sheep, 350 goats, and 103 camels. The same study also reported the first case of this larva in a camel liver (1%) in Egypt (Omar et al., 2016). In Bangladesh, 12.9% of goats were infected (Dey et al., 2022). A larger study in Kazakhstan found lower rates: 0.6% in cattle and 1.1% in sheep (Kiyan et al., 2025).

Research in Van province indicates that *C. tenuicollis* infection is a major issue. Earlier studies reported prevalence rates of 72.89% in sheep, 58.85% in goats, and 10.86% in cattle (Değer et al., 2001). Another study in Van found an infection rate of 27.9% (Oğuz & Değer, 2013). A later, more detailed study confirmed that *C. tenuicollis* is among the most common metacestodes in Van, causing significant economic losses (Değer & Biçek, 2005).

Collectively, these studies demonstrate that *C. tenuicollis* infection is widespread. Overall, they show that *C. tenuicollis* infection is common in Van province and poses a serious risk to small ruminant farming. However, more recent data are needed on the current prevalence of the infection, the parasite's genetic makeup, and its transmission among hosts. This study aims to determine whether the prevalence of *C. tenuicollis* in sheep in Van has changed in recent years and to compare the genetic characteristics of local isolates with those reported from other regions.

Materials and Methods

Study Area

The study material consisted of 100 sheep slaughtered at the Van Metropolitan Municipality Slaughterhouse from June to December 2025.

Postmortem Examination and Prevalence Determination

All sheep underwent routine postmortem inspection at the slaughterhouse. The abdominal cavity and visceral organs, particularly the omentum, mesentery, liver surface, and peritoneum, were macroscopically examined for *C. tenuicollis* cysts. Prevalence was calculated as the number of infected animals divided by the total number of examined sheep.

Collection of Cysts

Cysts detected during postmortem examination were carefully collected, and their anatomical locations were recorded. Representative samples were then subjected to molecular analysis.

Animal Data

The animals' ages and sexes were recorded, and the sheep were grouped for statistical analysis.

DNA Extraction

Genomic DNA was isolated from scolices collected from cysts using a commercial kit (DNA Mini Kit, Qiagen, Germany) according to the manufacturer's instructions. The extracted DNA was stored at -20°C until PCR analysis. For PCR, primers JB3 (5'-TTTTTTGGGCATCCTGAGGTTTAT-3') and JB4.5 (5'-TAAAGAAAGAACATAATGAAAATG-3') were used to amplify a 446-bp region of the mt-CO1 gene (Bowles et al., 1992). The mt-CO1 gene region was amplified in a 30 µl PCR mixture containing 200 µM of each dNTP, 10 pmol of each primer, 1× PCR buffer, 1.25 U/µl DreamTaq DNA Polymerase (Thermo Scientific), and 3 µl of template DNA. The reaction conditions were as follows: initial denaturation at 95°C for 3 minutes; 35 cycles of denaturation at 95°C for 1 minute, annealing at 54°C for 1 minute, and extension at 72°C for 1 minute; followed by a final extension at 72°C for 10 minutes. PCR products were visualized on an agarose gel using SafeView dye. Positive amplicons were sequenced in both directions using the same primers (Macrogen, Ankara, Türkiye). The mt-CO1 gene sequence data were analyzed using BioEdit (Hall et al., 2011).

Sequence Analysis

Purified PCR products were sent to Macrogen in Ankara, Türkiye, for Sanger sequencing. The resulting sequences were analyzed in BioEdit (Hall et al., 2011) using

the Clustal/W method (Higgins et al., 1996). Sequence similarity was assessed with NCBI BLAST (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Phylogenetic analysis of *T. hydatigena* was conducted using the mt-CO1 locus, incorporating additional isolates from GenBank. The phylogenetic tree was constructed in MEGA 12 (Kumar et al., 2024). ModelTest in MEGA 12 was used to identify the best-fit model, and the Tamura 3+I model (Tamura, 1992) was applied for Maximum Likelihood analyses. Bootstrap analysis with 1000 replicates was used to evaluate the reliability of the results.

Statistical Analysis

The data from the study were analyzed using SPSS V16.0 (IBM, Chicago, IL, USA). The relationship between grouped variables was assessed using the chi-square test. Differences were considered statistically significant when $P < 0.05$.

Results

Of the 100 sheep examined, 32 were male and 68 were female. *C. tenuicollis* cysts were detected in 25 animals, yielding an overall prevalence of 25.0%. Infection rates were 28.1% (9/32) in males and 23.5% (16/68) in females, with no significant difference between groups ($p > 0.05$). In contrast, infection was significantly more common in sheep older than 3 years (42.5%, 17/40) than in those aged 3 years or younger (13.3%, 8/60) ($p = 0.001$) (Table 1).

Table 1. Prevalence of *C. tenuicollis* according to gender and age group in sheep.

Variable	Category	n(examined)	n(positive)	Prevalence (%)	Pvalue
Gender	Male	32	9	28.1	0.62
	Female	68	16	23.5	
Age group	≤3 years	60	8	13.3	0.001*
	>3 <u>years</u>	40	17	42.5	
Total		100	25	25.0	

*Significant at $p < 0.05$.

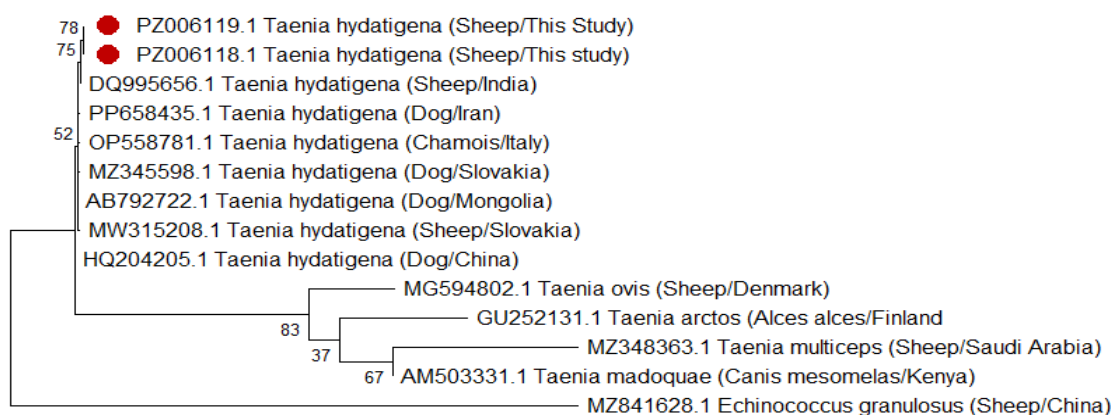


Figure 1. Phylogenetic tree showing relationships among *T. hydatigena* isolates (PZ006119.1, PZ006118.1) based on the mt-CO1 gene region, inferred using the Maximum Likelihood method. *Echinococcus granulosus* (MZ841628.1) served as the outgroup.



Figure 2. *C. tenuicollis* cyst located in the omentum. Arrow: scolex within the cyst fluid.

Phylogenetic Analysis

Homology and phylogenetic analyses showed that the *T. hydatigena* isolates from this study (GenBank accession numbers PZ006119.1 and PZ006118.1) were 100% identical to cattle isolates from China (OP861564.1, OP861557.1, and OP861563.1). In addition, the study isolates showed high similarity to other *T. hydatigena* sequences in GenBank (DQ995656.1, PP658435.1, OP558781.1, MZ345598.1, AB792722.1, MW315208.1, and HQ204205.1). *Echinococcus granulosus* (MZ841628.1) served as the outgroup in the phylogenetic tree.

Discussion

It is especially common in small ruminants and pigs (Peña-Espinoza et al., 2013; Yıldırım et al., 2015). This study found that 25% of sheep in Van province were infected with *C. tenuicollis*. This result is similar to other studies in Türkiye, where prevalence rates range from 12.3% to 65.67% (Çelik et al., 2021). Worldwide, rates vary widely, with some studies reporting up to 79% in Ethiopia (Sissay et al., 2008), 42.2% in Tanzania (Miran et al., 2016), and 15.17% in India (Nimbalkar et al., 2011). Compared with the earlier rate of 72.89% in Van (Değer et al., 2001; Oğuz & Değer, 2013), the current 25% may indicate a decline in infection pressure in the region. However, this difference should be interpreted with caution, as variations in study period, sample size, sampling strategy, slaughterhouse conditions, and animal population characteristics may have influenced the reported prevalence rates. Therefore, improvements in control practices and slaughterhouse hygiene may be considered among several possible explanations for the lower prevalence observed in the present study, rather than a definitive cause.

By age, infection was much more common in sheep older than 3 years (42.5%) than in those 3 years or younger (13.3%), and this difference was statistically significant ($p = 0.001$). This is likely because older sheep are exposed to parasite eggs for longer periods while grazing (Dyab et al., 2017; Laranjo-González et al., 2016). Some researchers also suggest that older animals may have weaker immune systems, which could increase infection rates (Dyab et al., 2017). For gender, there was no significant difference (28.1% in males and 23.5% in females), indicating similar risk between the sexes. These results align with findings from Tanzania and Iraq, where no significant gender differences were observed (Hama et al., 2018; Miran et al., 2016).

In a study by Oğuz and Değer (2013) on sheep in Van, the infection rate of *C. tenuicollis* was reported as 27.9%. In a molecular study by Ütük and Pişkin (2012) on cysts collected from goats, 99% similarity to the reference sequences (DQ995656.1, HQ204206.1) was reported. In our study, however, 100% similarity was observed with sequences obtained from studies conducted in China and Egypt (OP861564.1, AB513874.1).

The mitochondrial *cox1* gene used in this study was a reliable marker for understanding the parasite's genetic structure (Çelik et al., 2021). The isolates were 100% identical to strains from China and Egypt, indicating that *T. hydatigena* has a largely conserved genetic structure worldwide (Hama et al., 2018; Mohammed & Kadir, 2020). Thus, although the parasite is found in many regions and hosts, its main genetic profile remains the same, though new mutations can occasionally arise in certain locations (Mohammed & Kadir, 2020). *C. tenuicollis* is a major economic problem for the livestock industry. Severe infections can cause serious liver damage and *hepatitis cysticercosa*, sometimes leading to death in young animals (Çelik et al., 2021; Yıldırım et al., 2015). Discarding livers and carcasses at slaughterhouses also causes significant financial losses. For example, annual losses in Italy are about €333,657, and in Egypt, liver condemnations cost thousands in local currency (Çelik et al., 2021; Omar, 2021; Ras et al., 2024).

The 25% prevalence found in Van still puts pressure on animal health and the local economy. To control this infection, it is important to manage the parasite in dogs and ensure that slaughterhouse waste is properly disposed of so that dogs cannot access it.

References

- Abd El-Aziz, O. M., Hassanin, F. S., Shaltout, F. A. E., & Mohammed, O. (2021). Prevalence of some zoonotic parasitic affections in sheep carcasses in a local abattoir in Cairo, Egypt. *Benha Veterinary Medical Journal*, 41(1), 115-119. <https://doi.org/10.31579/2690-8816/038>
- Bowles, J., Blair, D., & McManus, D. P. (1992). Genetic variants within the genus *Echinococcus* identified by mitochondrial DNA sequencing. *Molecular and Biochemical Parasitology*, 54(2), 165-173.
- Bozkurt, M. F., Eser, M., Demirel, H. H., & Kozan, E. (2015). Acute severe cysticercosis in a sheep: Hepatitis cysticercosa, pneumonitis cysticercosa and lymphadenitis cysticercosa. *Kocatepe Veterinary Journal*, 8(2), 105-108. <https://doi.org/02145050009987>
- Celik, F., Kilinc, S. G., Kesik, H. K., Ahmed, H., & Simsek, S. (2021). In-silico analysis of mt-CO1 gene of *Taenia hydatigena* sheep isolates. *Helminthologia*, 58(1), 59. <https://doi.org/10.2478/helm-2021-0007>
- Değer, S., & Biçek, K. (2005). Van ve yöresinde koyunlarda endoparaziter fauna tespiti ve paraziter invazyonların kontrolü üzerine öneriler. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 16(1), 51-54.
- Değer, S., Biçek, K., Gül, A., & Eraslan, E. (2001). Van yöresinde koyun, keçi ve sığırlarda *Cysticercosis tenuicollis*'in yaygınlığı. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1-2), 105-107.
- Dey, A. R., Hasan, M., Hoque, M. R., Siddiqui, T. R., & Alam, M. Z. (2022). Morphometry and genetic diversity pattern of *Cysticercus tenuicollis*, an important food-borne taeniid metacestode in goats in Bangladesh. *Infection, Genetics and Evolution*, 105, Article 105364. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2022.105364>
- Dyab, A., Marghany, M., Osman, R., & Ahmed, M. (2017). Cysticercosis in small ruminants slaughtered in Aswan slaughterhouse, Egypt. *Assiut Veterinary Medical Journal*, 63 (155), 73-80.
- Filip-Hutsch, K. J., Pyziel, A. M., Jeżewski, W., Myczka, A. W., Demiaszkiewicz, A. W., & Laskowski, Z. (2019). First molecular identification of *Taenia hydatigena* in wild ungulates in Poland. *EcoHealth*, 16(1), 161-170. <https://doi.org/10.1007/s10393-019-01392-9>
- Hama, A. A., Zorab, R. H., Ali, F. M., Salih, A. M., & Hassan, A. A. (2018). Prevalence and molecular characterization of *Cysticercus tenuicollis* isolated from some intermediate host in Kurdistan-Iraq. *Kurdistan Journal of Applied Research*, 177-182. <https://doi.org/10.24017/science.2018.2.30>
- Hama-Soor, T. A., Mohammed, A. A., & Weli, S. (2021). Novel isolate of *Cysticercus tenuicollis*-Kalar isolate has been revealed in Kalar, Iraq. *The Journal of Infection in Developing Countries*, 15(10), 1532-1538. <https://doi.org/10.3855/jidc.12758>

- Higgins, D. G., Thompson, J. D., & Gibson, T. J. (1996). Using CLUSTAL for multiple sequence alignments. In *Methods in enzymology* (Vol. 266, pp. 383-402). Academic Press.
- Jia, W. Z., Yan, H. B., Guo, A. J., Zhu, X. Q., Wang, Y. C., Shi, W. G., Chen, G., Li, J. F., Zhang, P., & Cai, X. P. (2010). Complete mitochondrial genomes of *Taenia multiceps*, *T. hydatigena* and *T. pisiformis*: Additional molecular markers for a tapeworm genus of human and animal health significance. *BMC Genomics*, 11(1), Article 447.
- Khan, J., Basharat, N., Khan, S., Jamal, S. M., & Rahman, S. U. (2021). Prevalence and molecular characterization of cystic echinococcosis in livestock population of the Malakand division, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Article 123456. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.757800>
- Kiyan, V., Smagulova, A., Uakhit, R., Hermosilla, C., Lider, L., Jazina, K., & Manapov, N. (2025). Molecular identification of cryptic cysticercosis: *Taenia* spp. in wild and domestic intermediate hosts in Kazakhstan. *Diversity*, 17(9), 655. <https://doi.org/10.3390/d17090655>
- Kumar, S., Stecher, G., Suleski, M., Sanderford, M., Sharma, S., & Tamura, K. (2024). MEGA12: Molecular evolutionary genetic analysis version 12 for adaptive and green computing. *Molecular Biology and Evolution*, 41(12), msae263. <https://doi.org/10.1093/molbev/msae263>
- Laranjo-González, M., Devleesschauwer, B., Gabriël, S., Dorny, P., & Allepuz, A. (2016). Epidemiology, impact and control of bovine cysticercosis in Europe: A systematic review. *Parasites & Vectors*, 9(1), Article 81. <https://doi.org/10.1186/s13071-016-1362-3>
- Miran, M. B., Kasuku, A. A., & Swai, E. S. (2017). Prevalence of echinococcosis and *Taenia hydatigena* cysticercosis in slaughtered small ruminants at the livestock-wildlife interface areas of Ngorongoro, Tanzania. *Veterinary World*, 10(4), 411. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2017.411-417>
- Mohammed, A. A., & Kadir, M. A. A. (2020). Molecular and phylogenetic studies of *Taenia hydatigena* cysts in native sheep in Sulaimani Province, Iraq. *Indian Journal of Animal Sciences*, 90(1), 22-27.
- Nimbalkar, R. K., Shinde, S. S., Kantikar, V. N., & Muley, S. P. (2011). Study on *Taenia hydatigena* in the slaughtered sheep (*Ovis bharal*) and goats (*Capra hircus*) in Maharashtra, India. *Global Veterinaria*, 6(4), 374-377.
- Oguz, B., & Değer, S. (2013). Cystic echinococcosis and cysticerci of *Taenia hydatigena* in cattle and sheep slaughtered in a Van local slaughterhouse. *Türkiye Parazitolojii Dergisi*, 37(3), 186. <https://doi.org/10.5152/tpd.2013.41>
- Omar, M. A. E., Elmajdoub, L. O., Al-Aboody, M. S., Elsify, A. M., Elkhtam, A. O., & Hussien, A. A. (2016). Molecular characterization of *Cysticercus tenuicollis* of slaughtered livestock in Upper Egypt governorates. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(8), 706-708. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2016.06.009>
- Ras, R., Mahmoud, A. F. A., Hafez, A. E. S. E., Ghazaly, E. E. I., Shata, R. H. M., & El-Tahlawy, A. S. (2024). Economic impact of edible offal rejection at El-Qurein slaughterhouse, Egypt. *Theory and Practice of Meat Processing*, 9(2), 145-152.
- Tamura, K. (1992). Estimation of the number of nucleotide substitutions when there are strong transition-transversion and G+C-content biases. *Molecular Biology and Evolution*, 9(4), 678-687.

Yıldırım, S., İlhan, F., Kılınç, Ö. O., Ekici, P. T., & Gül, Y. (2015). Histopathological and immunohistochemical evaluation of acute hepatitis cysticercosa in a lamb. *Van Veterinary Journal*, 26(2), 107-110.

Enhanced Photoresponse and Antibacterial Performance of Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al Hybrid Bio-Nanocomposite Photodiode

Gökhan Gök¹ and Ali Rıza Deniz^{2*}

¹Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, Hakkari University, 30000, Hakkâri, Türkiye

²Department of Electric and Energy, Çölemerik V.H.S., Hakkari University, 30000, Hakkâri, Türkiye
email: alirizadeniz@hakkari.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1943013

Geliş tarihi/Received:03/05/2026

Kabul tarihi/Accepted:16/07/2026

Abstract

In this study, an environmentally friendly and multifunctional Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al hybrid bio-nanocomposite photodiode was successfully fabricated and its structural, optical, electrical, and antibacterial properties were comprehensively investigated. The Gelatin:Ag NP interfacial layer combines the biocompatibility and film-forming capability of natural gelatin with the high conductivity and plasmonic properties of silver nanoparticles. SEM analyses revealed that Ag nanoparticles were homogeneously distributed within the gelatin matrix with nanoscale particle dimensions. XRD results confirmed the successful formation of crystalline face-centered cubic Ag nanoparticles embedded in the amorphous gelatin framework. UV-Vis measurements exhibited a characteristic localized surface plasmon resonance band around 410 nm, while the optical band gap of the nanocomposite was determined as 3.21 eV. Current-voltage measurements demonstrated pronounced rectifying behavior under all measurement conditions, confirming the successful formation of a Schottky junction. With increasing illumination intensity, the reverse-bias photocurrent significantly increased, indicating efficient photodetection capability. The ideality factor and barrier height were extracted using thermionic emission theory, whereas the series resistance values were obtained from Cheung functions. The ideality factor increased from 1.17 to 3.05, while the barrier height decreased from 0.87 eV to 0.62 eV under increasing illumination. In addition, the device exhibited high photocurrent, enhanced responsivity, and specific detectivity values reaching the order of 10^{13} Jones. The obtained $\alpha=0.97$, $\beta=0.42$, and $\gamma=0.36$ values confirmed stable and reliable power-dependent photoresponse behavior. Antibacterial tests showed that the fabricated device effectively inhibited both *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* strains. The strongest antibacterial activity was achieved under 365 nm UV illumination, while visible-light exposure also provided enhanced activity compared with the dark condition. These results were attributed to Ag⁺ ion release, reactive oxygen species generation, and plasmon-assisted photoactivation processes. Overall, the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al structure offers a promising next-generation multifunctional optoelectronic platform combining high photodetector performance, low-cost fabrication, biocompatibility, and light-enhanced antibacterial functionality.

Keywords: Photodiode, I-V, Photosensitivity, Detectivity, Gelatin:Ag NP

Au/Jelatin:Ag NP/p-Si/Al Hibrit Biyo-Nanokompozit Fotodiyotun Geliştirilmiş Foto tepkisi ve Antibakteriyel Performansı

Özet

Bu çalışmada, çevre dostu ve çok fonksiyonlu bir fotodedektör yapısı olarak Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al hibrit biyo-nanokompozit fotodiyot başarıyla üretilmiş ve yapısal, optik, elektriksel ve antibakteriyel özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ara tabaka olarak kullanılan Gelatin:Ag NP nanokompoziti, doğal jelatinin biyoyumluluğu ve film oluşturma kabiliyeti ile Ag nanopartiküllerin yüksek iletkenlik ve plazmonik özelliklerini bir araya getirmektedir. SEM analizleri Ag nanopartiküllerin jelatin matrisi içerisinde homojen dağıldığını ve ortalama parçacık boyutunun nano ölçekli aralıkta olduğunu göstermiştir. XRD sonuçları, amorf jelatin fazı içerisinde yüzey merkezli kübik yapıya sahip kristalin Ag nanopartiküllerin başarılı şekilde oluştuğunu doğrulamıştır. UV-Vis analizlerinde yaklaşık 410 nm civarında gözlenen yüzey plazmon rezonans bandı Ag nanopartiküllerin varlığını desteklerken,

optik bant aralığı 3.21 eV olarak hesaplanmıştır. Fotodiyotun akım-gerilim karakteristikleri, yapının tüm ölçüm koşullarında belirgin doğrultucu davranış sergilediğini göstermiştir. Aydınlatma şiddeti arttıkça ters besleme bölgesindeki fotoakım önemli ölçüde artmış, bu durum cihazın etkin ışık algılama kapasitesini ortaya koymuştur. Termiyonik emisyon modeli ile idealite faktörü ve bariyer yüksekliği, Cheung fonksiyonları ile seri direnç değerleri hesaplanmıştır. İdealite faktörü 1.17'den 3.05'e yükselirken, bariyer yüksekliği 0.87 eV'den 0.62 eV'e düşmüştür. Ayrıca cihaz, yüksek fotoakım, artan duyarlılık ve 10^{13} Jones mertebesinde özgül dedektiflik değeri sergilemiştir. $\alpha=0.97$, $\beta=0.42$ ve $\gamma=0.36$ değerleri, cihazın ışık şiddetine karşı kararlı ve güvenilir tepki verdiğini göstermektedir. Antibakteriyel testlerde, yapı hem *Escherichia coli* hem de *Staphylococcus aureus* bakterilerine karşı etkili inhibisyon göstermiştir. En yüksek antibakteriyel etkinlik 365 nm UV ışık altında elde edilmiş, görünür ışık altında da karanlık ortama kıyasla belirgin artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar, Ag nanopartiküllerin iyon salınımı, reaktif oksijen türleri oluşumu ve plazmonik fotoaktivasyon mekanizmaları ile açıklanmıştır. Sonuç olarak, Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al yapısı; yüksek fotodedektör performansı, düşük maliyetli üretim, biyoyumumluluk ve ışık destekli antibakteriyel aktivite özelliklerini aynı anda sunan umut verici yeni nesil çok fonksiyonlu bir optoelektronik platformdur.

Anahtar Kelimeler: Fotodiyot, I-V, Fotoduyarlılık, Dedektiflik, Jelatin:Ag NP

Introduction

Photodiodes are among the most important optoelectronic devices used for converting incident light into electrical signals, finding widespread applications in optical communication systems, environmental monitoring, imaging technologies, biomedical sensing, and energy-efficient detection platforms. Silicon-based photodiodes, particularly p-type silicon (p-Si), remain highly attractive owing to their mature fabrication technology, low cost, excellent carrier mobility, and compatibility with large-scale microelectronic integration (Karaca, et. al., 2026). However, the performance of conventional metal/Si photodiodes is often restricted by high surface recombination, interface defect states, leakage current, and insufficient spectral selectivity. Therefore, introducing functional interfacial layers between the metal contact and semiconductor substrate has become an effective strategy to improve photodiode characteristics (Hussaini, et. al., 2024).

Recently, organic and bio-derived interlayers have attracted considerable attention due to their low-cost processing, environmental sustainability, mechanical flexibility, and tunable electronic properties. Biopolymer-based thin films can effectively passivate silicon surface states, regulate charge transport across the junction, and suppress dark current, thereby enhancing rectification ratio, responsivity, and specific detectivity. Among these materials, gelatin has emerged as a promising candidate because of its excellent film-forming ability, biodegradability, optical transparency, hydrophilic functional groups, and facile solution processability. The presence of amino, carboxyl, and hydroxyl groups in gelatin can contribute to improved interfacial adhesion and trap-state modulation at the metal/semiconductor contact (Jiang, et. al., 2024). To further enhance the optoelectronic performance of gelatin-based interlayers, the incorporation of metallic nanoparticles has become an attractive approach. Silver nanoparticles (Ag NPs) are particularly interesting due to their high electrical conductivity, localized surface plasmon resonance (LSPR), strong visible-light interaction, and ability to promote efficient charge separation and transport. When embedded into a gelatin matrix, Ag nanoparticles can create a hybrid nanocomposite interlayer combining the mechanical and chemical advantages of the biopolymer with the plasmonic and conductive benefits of metallic nanostructures. Such synergistic effects may lead to reduced barrier inhomogeneity, enhanced photogenerated carrier

collection, broadened spectral response, and faster photo-switching behavior (Lee, et. al., 2022).

Although various interfacial-layer-assisted silicon photodiodes have been reported in the literature, studies focusing on gelatin-based plasmonic bio-nanocomposite interfaces remain very limited. More importantly, previous reports have predominantly concentrated on improving the electrical and optical characteristics of photodiodes, whereas the integration of photodetection performance and antibacterial functionality within a single silicon-based platform has rarely been addressed. In this respect, the present work introduces a distinctive Au/Gelatin NP/p-Si/Al hybrid photodiode architecture, where gelatin serves as a biodegradable and biocompatible interfacial matrix and Ag nanoparticles provide both plasmonic optoelectronic enhancement and antimicrobial activity. The originality of this study lies not only in employing a sustainable gelatin NP hybrid interlayer for Schottky photodiode fabrication, but also in systematically correlating its structural, optical, electrical, and antibacterial characteristics under dark and illuminated conditions. The obtained results demonstrate that the proposed hybrid structure simultaneously offers enhanced photoresponse, high detectivity, and light-assisted antibacterial activity, thereby presenting a promising multifunctional platform for next-generation self-sterilizing optoelectronic devices and bio-integrated sensing applications.

Materials and Methods

Preparation of Gelatin:Ag NP Nanocomposite Interfacial Layer

Gelatin used in this study is a natural biopolymer commonly obtained through the partial hydrolysis of collagen-rich animal connective tissues such as bovine skin, fish skin, bones, and tendons. During this process, the triple-helix collagen structure is converted into water-soluble polypeptide chains containing abundant amino, carboxyl, and hydroxyl functional groups. Owing to its biodegradability, non-toxicity, excellent film-forming capability, and surface-active functional moieties, gelatin is considered a highly attractive material for interfacial engineering in optoelectronic devices. For nanocomposite preparation, an appropriate amount of gelatin powder was first dissolved in deionized water under continuous magnetic stirring at 40–50 °C until a clear and homogeneous viscous solution was obtained. The moderate heating temperature ensured complete dissolution of gelatin without structural degradation. After complete dissolution, the solution was allowed to stabilize while maintaining continuous stirring. Subsequently, Silver nanoparticles (Ag NPs) or a precursor silver salt dispersion was gradually introduced into the gelatin solution under vigorous stirring. The nanoparticle loading concentration was adjusted according to the desired optical and electrical properties of the interfacial layer. The mixture was then stirred for an additional period to promote uniform nanoparticle distribution throughout the gelatin matrix. To minimize agglomeration and improve nanoscale dispersion, the resulting suspension was further treated in an ultrasonic bath. Sonication facilitated homogeneous incorporation of Ag nanoparticles into the polymer network and improved the stability of the colloidal nanocomposite solution. Finally, the prepared Gelatin:Ag NP solution was cooled to room temperature and filtered to remove large aggregates. The obtained stable and homogeneous bio-nanocomposite solution was then used for deposition onto the p-Si substrate as an interfacial layer in the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode

structure. The hybrid layer combines the passivation and adhesion properties of gelatin with the plasmonic conductivity enhancement provided by Ag nanoparticles, making it highly suitable for multifunctional optoelectronic applications.

Fabrication Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al Photodiodes

Prior to device fabrication, the p-type silicon (p-Si) wafers with (100) orientation and a resistivity of 1–10 $\Omega \cdot \text{cm}$ were cleaned using a conventional RCA-based surface treatment procedure to remove organic and inorganic contaminants (Çaldıran, et. al., 2021). Initially, the substrates were ultrasonically cleaned in acetone, ethanol, and deionized water for 10 min each. The samples were then dried under nitrogen flow. To remove the native oxide layer, the wafers were immersed in diluted HF solution (2%) for 1 min, rinsed thoroughly with deionized water, and dried immediately (Deniz, et. al. 2013). For the formation of the rear ohmic contact, aluminum (Al) was thermally evaporated onto the unpolished backside of the p-Si wafers under a vacuum pressure of approximately 2×10^{-5} Torr. The Al-coated substrates were subsequently annealed at 500 °C for 5 min in a nitrogen atmosphere to improve contact adhesion and establish stable ohmic behavior. Afterward, the previously prepared Gelatin:Ag NP nanocomposite solution was deposited onto the polished front surface of the cleaned p-Si substrates via the spin-coating technique. Approximately 100 μL of the solution was dropped onto each substrate, followed by spinning at 3000 rpm for 60 s to obtain a uniform thin interfacial layer. The coated samples were then soft-baked at 80 °C for 10 min to remove residual solvent and enhance film adhesion. Subsequently, circular gold (Au) top contacts with a diameter of approximately 1.5 mm were deposited through a shadow mask onto the coated surface using a thermal evaporation system under a vacuum pressure of 1×10^{-5} Torr. ,

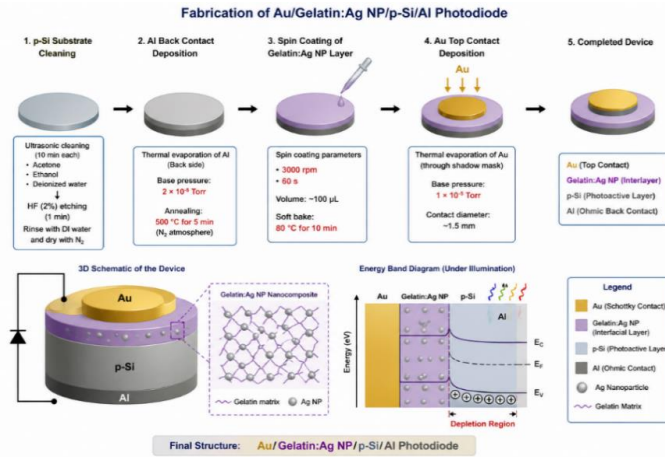


Figure 1. Schematic fabrication process, device architecture, and energy band diagram of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode.

The effective contact area of the device was defined by the shadow mask geometry. The final device configuration was Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al, where Au served as the Schottky contact, the Gelatin:Ag NP nanocomposite acted as the multifunctional interfacial layer, p-Si functioned as the photoactive semiconductor substrate, and Al provided the rear ohmic contact. The fabricated photodiodes were kept under ambient

laboratory conditions before electrical characterization. Dark and illuminated current–voltage (I–V) measurements were then carried out to investigate the rectification behavior, photoresponse characteristics, and charge transport properties of the devices. The Figure 1 illustrates the step-by-step fabrication route of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode,

Results and Discussion

Morphological analysis of Gelatin:Ag NP thin film

Figure 2 presents the surface morphology of the synthesized Gelatin:Ag NP nanocomposite layer obtained by scanning electron microscopy (SEM). As shown in Figure 2(a), the gelatin matrix exhibits a relatively continuous and interconnected surface structure, indicating successful film formation on the substrate. Bright spherical features distributed throughout the surface correspond to embedded Silver nanoparticles (Ag NPs), confirming their effective incorporation into the biopolymer matrix. The nanoparticles are well dispersed over the gelatin network with only minor local aggregation, suggesting favorable compatibility between the gelatin chains and Ag nanostructures. The higher-magnification SEM image in Figure 2(b) reveals that the Ag nanoparticles possess predominantly quasi-spherical morphology and are anchored uniformly onto the gelatin surface. Such homogeneous dispersion is highly beneficial for interfacial charge transport, since conductive nanoparticle pathways can facilitate carrier extraction while minimizing localized recombination centers. In addition, the nanoscale roughness introduced by the Ag NPs may enhance light scattering and optical absorption within the active photodiode structure. The particle size histogram shown in Figure 2(c) indicates that the Ag nanoparticles exhibit a relatively narrow size distribution with an average diameter of approximately 18.6 ± 6.3 nm. This nanoscale size regime is particularly advantageous for plasmonic enhancement effects, where localized surface plasmon resonance can improve the interaction between incident photons and the semiconductor interface.

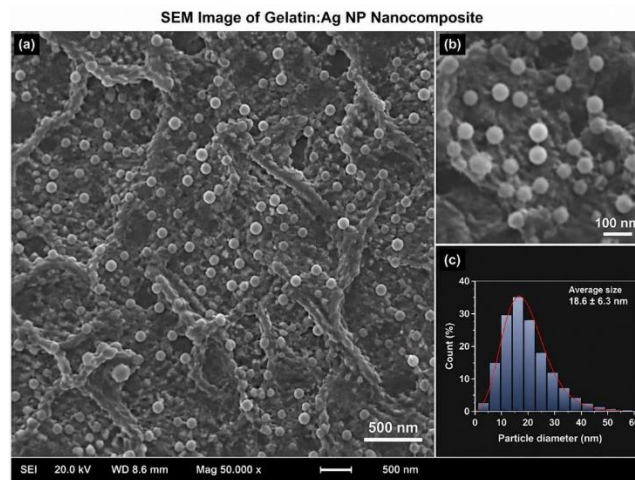


Figure 2. SEM micrographs and particle size distribution of the Gelatin:Ag NP nanocomposite thin film.

The controlled particle size and good dispersion quality are therefore expected to contribute positively to the photoresponse, responsivity, and detectivity of the fabricated Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode. Overall, the SEM analysis demonstrates that the prepared Gelatin:Ag NP layer possesses suitable morphological characteristics, including continuous film coverage, nanoscale particle dispersion, and moderate surface texturing, making it an effective multifunctional interfacial layer for optoelectronic and antibacterial device applications.

Figure 3 shows the X-ray diffraction (XRD) pattern of the synthesized Gelatin:Ag NP nanocomposite layer. A broad diffraction halo centered in the low-angle region (approximately 15–25°) is observed, which is characteristic of the amorphous structure of the Gelatin matrix. This broad feature confirms that gelatin predominantly retains its non-crystalline nature after composite formation and acts as a flexible host network for nanoparticle incorporation. In addition to the amorphous background, several distinct diffraction peaks appear at approximately 38.1°, 44.3°, 64.5°, and 77.3°, corresponding to the (111), (200), (220), and (311) crystallographic planes of face-centered cubic (fcc) Silver nanoparticles, respectively (Stanley, et. al. 2026). These reflections are in good agreement with standard silver reference data, confirming the successful formation of crystalline Ag nanoparticles within the gelatin matrix. The strong intensity of the (111) peak suggests that this plane is the preferential growth orientation of the embedded Ag nanocrystals. No additional impurity-related diffraction peaks are detected, indicating the high phase purity of the synthesized nanocomposite and the absence of undesired silver oxide or secondary crystalline phases (Hinaz, et. al. 2026). This result demonstrates that the preparation method enables stable nanoparticle formation without degrading the structural integrity of the biopolymer host.

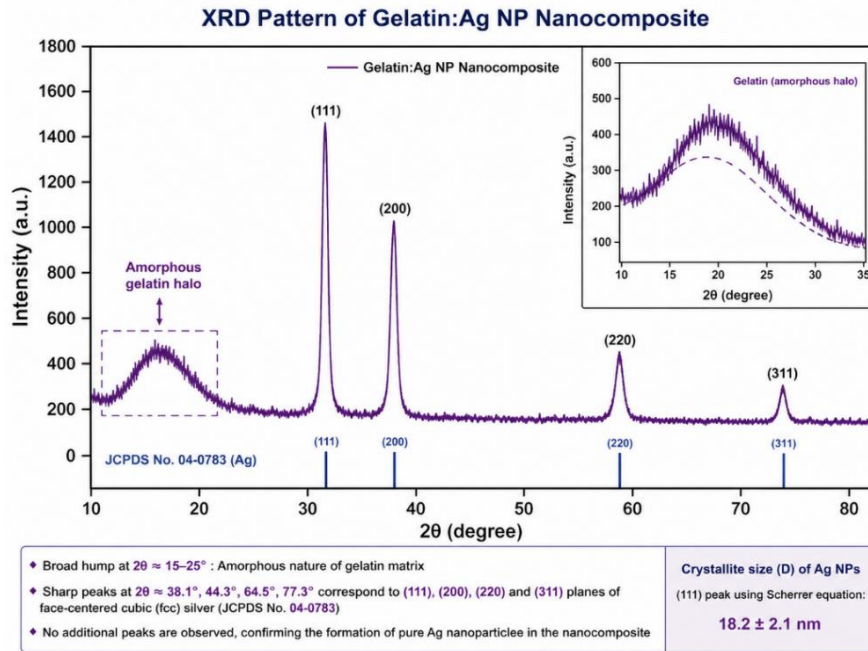


Figure 3. XRD pattern of the Gelatin:Ag NP nanocomposite thin film.

The average crystallite size of the Ag nanoparticles, estimated from the full width at half maximum (FWHM) of the dominant (111) peak using the Scherrer approach, is approximately 18.2 ± 2.1 nm. This value is in close agreement with the particle dimensions observed in SEM analysis, confirming the nanoscale character of the metallic phase. Overall, the XRD results verify that the prepared Gelatin:Ag NP layer consists of well-dispersed crystalline Ag nanoparticles embedded in an amorphous gelatin framework. Such a hybrid structure is highly favorable for photodiode applications, where the gelatin matrix can improve interfacial passivation while the crystalline Ag nanoparticles can enhance electrical conductivity and plasmon-assisted photoresponse.

Figure 4 presents the optical characterization of the synthesized Gelatin:Ag NP nanocomposite layer through UV–Vis absorption spectroscopy and Tauc band gap analysis. The UV–Vis absorption spectrum reveals a strong absorption feature in the ultraviolet region below approximately 300 nm, which is mainly attributed to the intrinsic electronic transitions of the peptide bonds and functional groups present in the Gelatin matrix. This pronounced UV absorption indicates that the biopolymer host can effectively interact with high-energy photons. A distinct and broad absorption band centered at approximately 410 nm is clearly observed in the visible region. This band corresponds to the LSPR of embedded Silver nanoparticles (Ag NPs), confirming their successful formation and homogeneous dispersion within the gelatin matrix. The presence of this plasmonic feature demonstrates strong light–matter interaction induced by the nanoscale metallic particles, which can be highly beneficial for enhancing optical harvesting and interfacial carrier generation in photodiode applications. The gradual decrease in absorbance toward longer wavelengths suggests relatively low nanoparticle aggregation and good optical stability of the nanocomposite film. Such behavior also indicates that the composite layer preserves sufficient optical transparency in the visible and near-infrared regions, which is advantageous for interfacial optoelectronic device integration.

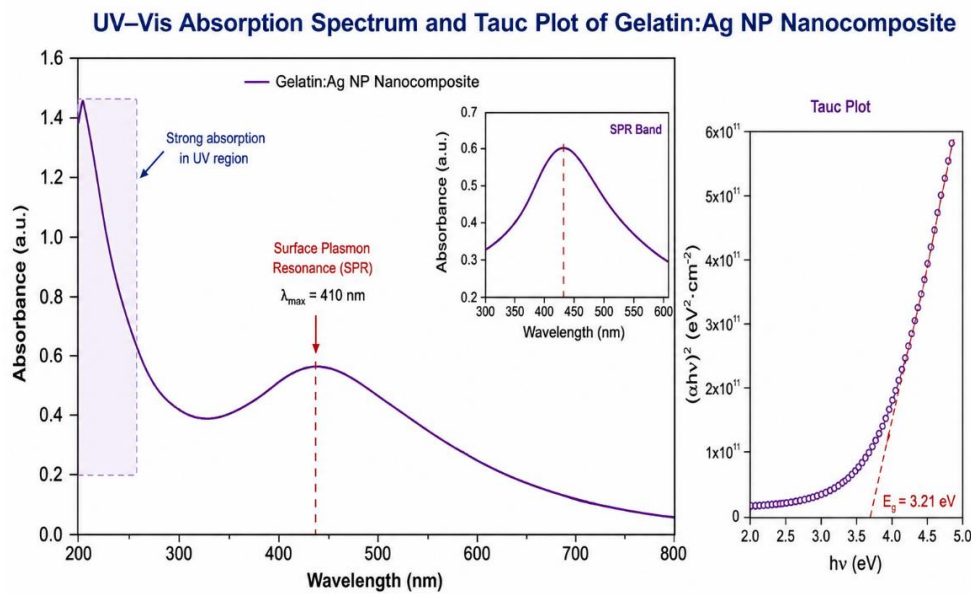


Figure 4. UV–Vis absorption spectrum and Tauc plot of the Gelatin:Ag NP nanocomposite thin film.

The optical band gap of the nanocomposite was estimated using the Tauc method from the linear region of the $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ plot, as shown in the inset (Dogru, et. al. 2023). The extrapolation of the fitted linear section to the photon energy axis yields a direct optical band gap value of approximately 3.21 eV. This band gap value suggests that the nanocomposite maintains semiconducting optical characteristics while benefiting from the plasmonic contribution of Ag nanoparticles.

Antibacterial Activity Analysis of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al Photodiode

The antibacterial properties of the fabricated Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode were evaluated against representative Gram-negative and Gram-positive bacterial strains, namely *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, using the agar diffusion (zone of inhibition) method. This analysis aims to investigate the bioactive functionality of the Gelatin:Ag NP interfacial layer in addition to its optoelectronic performance. For the antibacterial tests, bacterial suspensions were prepared and uniformly spread onto nutrient agar plates. The fabricated samples were then placed onto the inoculated surfaces and incubated at 37 °C for 24 hours. After incubation, clear inhibition zones formed around the samples were measured to quantify antibacterial activity. The results demonstrated that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al structure exhibits significant antibacterial activity against both tested bacterial strains. A more pronounced inhibition zone was observed for *Escherichia coli* compared to *Staphylococcus aureus*, which can be attributed to differences in cell wall structure between Gram-negative and Gram-positive bacteria. The thinner peptidoglycan layer in Gram-negative bacteria facilitates easier penetration of antibacterial agents, leading to enhanced susceptibility (Koh & Kim. 2025).

The observed antibacterial effect is primarily associated with the presence of Silver nanoparticles embedded within the gelatin matrix. Ag nanoparticles are well known for their strong antimicrobial activity, which arises from multiple mechanisms. These include the release of Ag^+ ions, disruption of bacterial cell membranes, interaction with intracellular proteins and DNA, and the generation of reactive oxygen species (ROS). The gelatin matrix acts as a stabilizing and dispersing medium, ensuring uniform distribution of Ag nanoparticles and sustained antibacterial activity. In addition, the intimate contact between the nanocomposite layer and bacterial cells may enhance surface-mediated interactions, further contributing to bacterial inactivation. The synergistic combination of gelatin and Ag nanoparticles thus provides both structural support and bioactivity, resulting in an effective antibacterial interface (Leelanarathiwat, et. al. 2020). Overall, the results confirm that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode possesses dual functionality, combining efficient photodetection capability with strong antibacterial performance. This multifunctional behavior makes the device a promising candidate for applications in bio-integrated optoelectronics, medical sensing platforms, and environmentally sustainable antimicrobial technologies (Agrawal, et. al. 2025).

Figure 5 presents the antibacterial performance of the fabricated Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode evaluated under dark, 365 nm UV, and visible-light illumination conditions against representative Gram-negative and Gram-positive bacterial strains, namely *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. The multi-panel figure demonstrates the light-dependent enhancement of antibacterial activity and reveals the multifunctional nature of the fabricated device. Panel (a) shows representative agar

diffusion photographs for both bacterial strains under different illumination environments. Clear inhibition zones are observed around the samples in all cases, confirming the intrinsic antibacterial activity of the Gelatin:Ag NP interfacial layer. However, the inhibition diameters significantly increase under light exposure, especially under 365 nm UV illumination. For *Escherichia coli*, the inhibition zone increases from 9.2 mm in darkness to 16.8 mm under UV light, while for *Staphylococcus aureus* it increases from 7.1 mm to 13.4 mm. These results indicate that photoactivation substantially improves bacterial suppression efficiency. Panel (b) summarizes the measured inhibition zone diameters. In all illumination conditions, the antibacterial effect against *Escherichia coli* is higher than that against *Staphylococcus aureus*. This difference is attributed to the thinner peptidoglycan layer and more permeable outer membrane structure of Gram-negative bacteria, which allows easier penetration of Ag^+ ions and reactive species. Panel (c) compares the bacterial inhibition percentages extracted from colony reduction measurements. The highest inhibition efficiencies are obtained under 365 nm UV illumination, reaching 81.6% for *Escherichia coli* and 69.3% for *Staphylococcus aureus*.

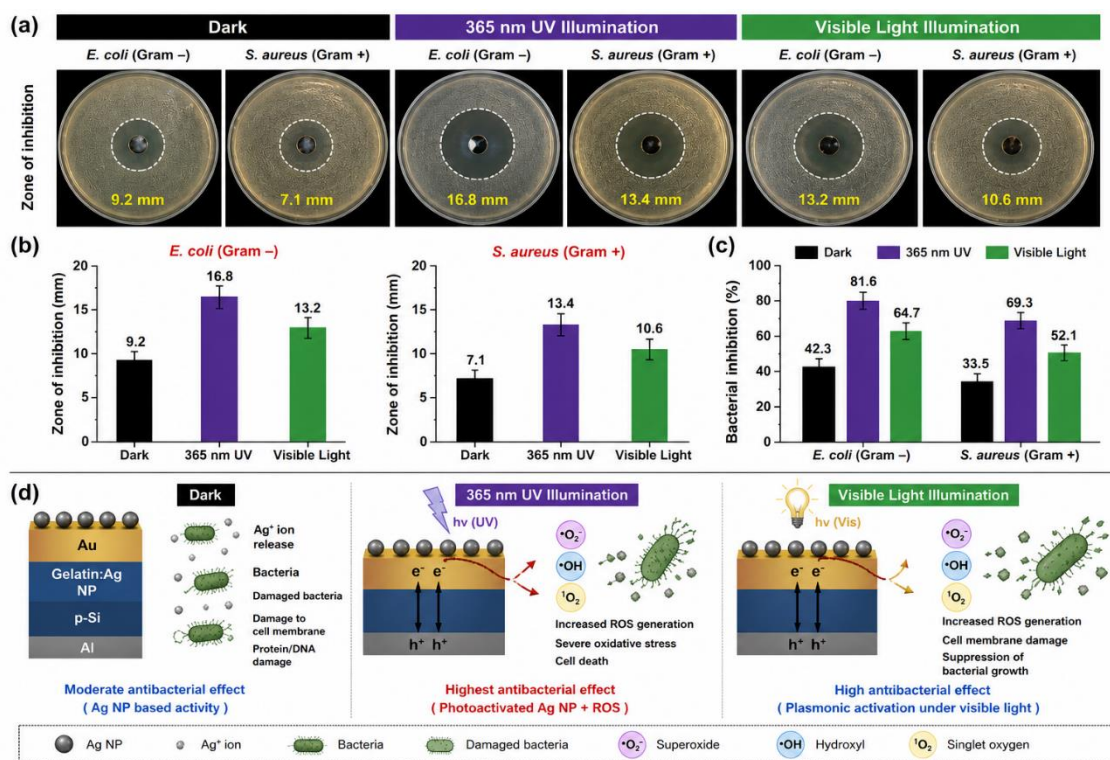


Figure 5. Comparative antibacterial activity of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode under dark, 365 nm UV, and visible-light illumination conditions.

Visible light also provides strong antibacterial enhancement compared with the dark condition, demonstrating that the Ag nanoparticle-containing structure can be activated not only by UV photons but also by visible-light plasmonic interactions. Panel (d) schematically illustrates the proposed antibacterial mechanism. In darkness, moderate antibacterial activity mainly originates from the natural antimicrobial effect of embedded Silver nanoparticles through Ag^+ ion release and membrane disruption. Under 365 nm UV illumination, photogenerated electron-hole pairs and intensified

ROS formation produce severe oxidative stress, resulting in the strongest antibacterial effect. Under visible-light illumination, LSPR of Ag nanoparticles enhances charge separation and ROS generation, yielding substantial antibacterial activity, although lower than that observed under UV light (Yao, et. al. 2022). Overall, the results confirm that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al device exhibits dual functionality by combining efficient photodetection capability with light-enhanced antibacterial performance. Such multifunctional behavior makes the device highly promising for self-sterilizing sensors, biomedical optoelectronics, antimicrobial smart surfaces, and next-generation sustainable photonic systems.

Analysis of Electrical and Optical Properties of Photodiode

The illumination-dependent electrical properties of the fabricated Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode were systematically investigated using semi-logarithmic current–voltage (I – V) measurements together with thermionic emission (TE) theory (Çaldıran, et. al. 2025) and Cheung function (Hemdani, et. al. 2026) analyses. The extracted diode parameters are summarized in Table 1, while the corresponding semi-log I – V and $dV/d\ln(I)$ – I plots are presented in Figure 7. These complementary approaches provide comprehensive insight into the carrier transport mechanism, barrier modulation, and resistive behavior of the hybrid bio-nanocomposite photodiode under optical excitation. The semi-logarithmic I – V curves (Figure 6) clearly reveal that the device exhibits pronounced rectifying characteristics under all illumination conditions, confirming the successful formation of a Schottky junction between the Au top contact and the Gelatin:Ag NP modified p-Si substrate. In the forward-bias region, the current increases exponentially, whereas in the reverse-bias region the current remains relatively low in darkness and increases progressively with light intensity due to the generation of photocarriers. This behavior demonstrates efficient light sensitivity and charge separation capability of the interfacial nanocomposite layer (Sevinç, et. al. 2026).

The n and zero-bias Φ_b were determined from the linear region of the forward-bias semi-log I – V plots according to the TE model. The obtained n values increase from 1.17 in darkness to 3.05 at 100 mW cm^{-2} , while Φ_b decreases from 0.87 eV to 0.62 eV with increasing illumination power. The near-unity ideality factor in darkness suggests relatively good junction quality and dominant thermionic emission transport. However, the gradual increase in n under illumination indicates increasing deviation from ideal diode behavior, which can be attributed to interface states, recombination processes, barrier inhomogeneity, trap-assisted transport, and interfacial polarization effects within the Gelatin:Ag NP layer (Deniz, 2021). The continuous reduction in barrier height with illumination indicates effective light-induced barrier lowering. Incident photons generate electron–hole pairs near the depletion region, thereby modifying the interfacial electric field and facilitating carrier transport across the Schottky barrier (Izmirli & Cavdar, 2025). In addition, the presence of Ag nanoparticles may contribute through localized surface plasmon resonance effects, enhancing local electromagnetic fields and promoting more efficient photocarrier generation and extraction (Farbod, et. al. 2021).

A more detailed interpretation of the illumination-dependent transport parameters can be explained by considering the interfacial conditions at the Au/Gelatin

NP/p-Si junction. The increase in the ideality factor from 1.17 in darkness to 3.05 under illumination indicates a gradual deviation from ideal thermionic-emission-dominated transport. This behavior is mainly attributed to interface-state-assisted recombination, barrier inhomogeneity, and polarization effects originating from the hybrid gelatin NP interfacial layer. Under illumination, the concentration of photogenerated carriers near the depletion region increases significantly, and a fraction of these carriers can be temporarily captured by localized trap states associated with functional groups of gelatin and nanoparticle/matrix boundaries. Such trapping–detrapping processes increase recombination probability and introduce non-ideal transport pathways, resulting in higher ideality factor values (Taşyürek, et. al. 2022). Furthermore, the decrease in barrier height from 0.87 eV to 0.62 eV can be associated with illumination-induced barrier lowering. Incident photons generate electron–hole pairs that alter the electric field distribution across the depletion region and reduce the effective Schottky barrier. In addition, the plasmonic Ag nanoparticles can intensify the local electromagnetic field through localized surface plasmon resonance, promoting more efficient photocarrier generation and extraction at the interface. The combined contribution of charge trapping, barrier inhomogeneity, interfacial polarization, and plasmon-assisted carrier transport therefore explains the observed illumination-dependent increase in ideality factor together with the reduction in barrier height (Yeşildağ, et. al. 2021).

The R_s values were extracted from the slope of the linear regions in the Cheung $dV/d\ln(I)$ functions. The linear behavior of these plots confirms the validity of Cheung's formalism for the fabricated device. The variation of R_s with increasing illumination is associated with changes in carrier mobility, current crowding, space-charge accumulation, and scattering phenomena within the hybrid interfacial layer. These resistive effects become more pronounced at higher illumination intensities where carrier density increases substantially (Kaçuş, et. al. 2014). The rectification ratio measured at ± 2 V decreases from 167.0 in darkness to 72.8 at 100 mW cm^{-2} . Although the ratio decreases under illumination, the device still preserves clear diode-like rectifying behavior. This reduction mainly originates from the significant increase in reverse-bias photocurrent, which is a desirable characteristic for photodetector applications because it reflects efficient photocharge collection under reverse electric field conditions (Orhan, et. al. 2024). Overall, the combined TE and Cheung analyses demonstrate that illumination strongly modifies the transport parameters of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode. The reduction in barrier height, enhanced reverse photocurrent, and maintained rectification behavior confirm that the Gelatin:Ag NP interfacial layer effectively improves photoresponse while preserving junction functionality (Karabulut, et. al. 2026). These results indicate that the fabricated device is a promising multifunctional and sustainable candidate for next-generation silicon-based photodetector applications.

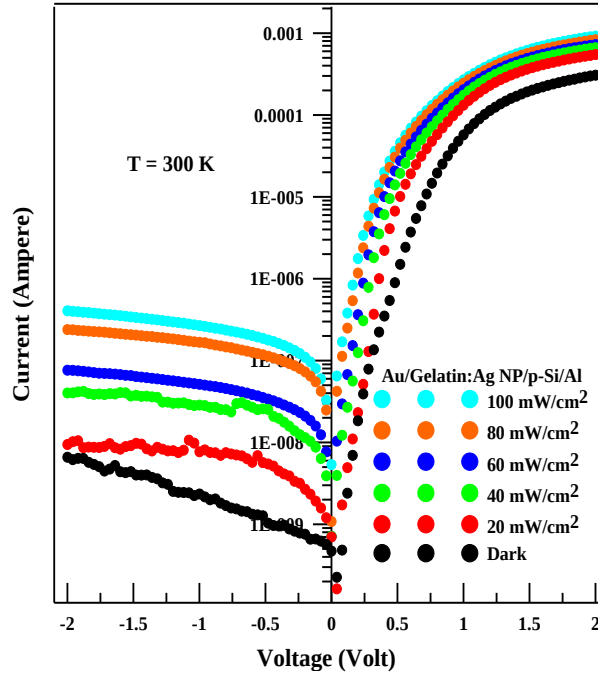


Figure 6. Semi-logarithmic I–V characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode under dark and various illumination intensities ($T = 300\text{ K}$).

Table 1. Electrical parameters of Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al structure under different light intensities

Light Power (mW/cm^2)	n	Φ_b (eV)	Rectification ratio ($\pm 2\text{V}$)
Dark	1.17	0.87	167.0
20	1.24	0.82	135.3
40	1.56	0.78	117.2
60	2.15	0.74	99.0
80	2.43	0.69	84.4
100	3.05	0.62	72.8

The electrical parameters obtained from thermionic emission (TE) and Cheung analyses show overall good agreement, confirming the reliability of the extracted diode characteristics. Minor differences between the two methods are expected because they are based on different regions of the forward-bias I–V characteristics. The TE model mainly reflects the low- and moderate-bias transport region, where thermionic emission is dominant and the influence of series resistance is relatively weak. In contrast, Cheung analysis is more sensitive to the higher-current region, where series resistance, barrier inhomogeneity, and interface-related non-ideal effects become more pronounced. Therefore, the slight deviations between the TE and Cheung results can be attributed to the hybrid Gelatin NP interfacial layer, localized interface states, and illumination-dependent resistive contributions across the Au/Gelatin NP/p-Si/Al structure (Erdoğan, et. al. 2024).

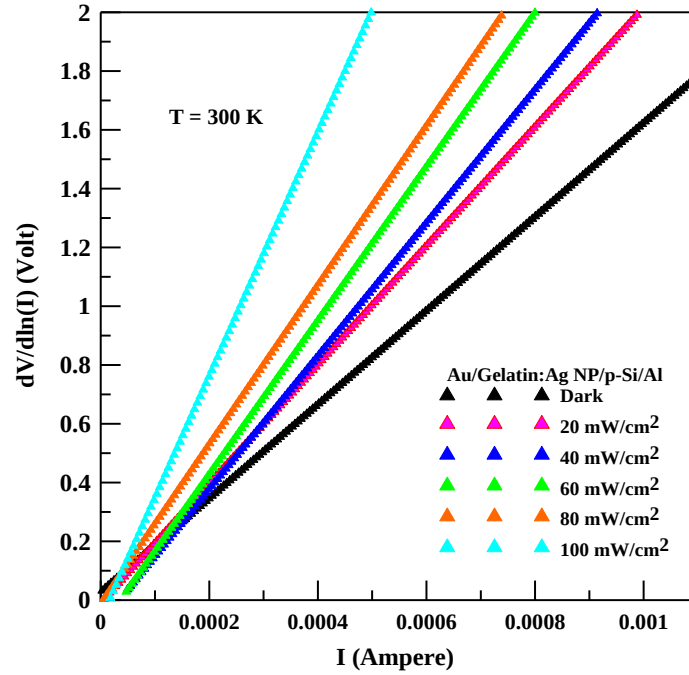


Figure 7. $dV/d\ln(I)$ versus I characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode under dark and different illumination intensities at 300 K.

Figure 8 presents the light-intensity-dependent photocurrent characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode measured under a reverse bias voltage of -2 V. The photocurrent (I_{ph}) values were calculated from the difference between the illuminated current (I_{illum}) and dark current (I_{dark}) measured at the same applied voltage using the following expression (Fidan, et. al. 2021):

$$I_{ph} = I_{illum} - I_{dark} \quad (1)$$

This approach provides the net photo-generated current by excluding the intrinsic dark conduction component of the device. As shown in Figure 8(a), the photocurrent increases steadily with increasing light power density from 20 to 100 mW cm^{-2} , demonstrating efficient photocarrier generation and collection within the device structure. The enhanced I_{ph} values under reverse bias indicate that the internal electric field effectively separates photogenerated electron-hole pairs and suppresses carrier recombination. The presence of the Gelatin:Ag NP interfacial layer is believed to contribute positively through improved interfacial transport, surface passivation, and plasmon-assisted light harvesting (Balasubramani, et. al. 2021). Figure 8(b) shows the $\log I_{ph}$ versus $\log P$ relationship, which follows the well-known power-law dependence:

$$I_{ph} = AP^\alpha \quad (2)$$

where A is a proportionality constant and α is the photoresponse exponent determined from the slope of the linear fit. From the fitted data, the slope was calculated as: $\alpha = 0.97$. An α value close to unity indicates that the photocurrent response is nearly linear with incident light intensity, reflecting efficient carrier generation and minimal trap-limited recombination processes. This suggests that most absorbed photons contribute effectively to measurable photocurrent and that the device exhibits stable intensity-

dependent behavior. Values of α significantly lower than unity are generally associated with defect-mediated trapping, recombination centers, or non-uniform transport pathways (Uzun, et. al. 2026). Therefore, the obtained $\alpha = 0.97$ confirms the high photoresponse quality of the fabricated photodiode and indicates that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al structure possesses low trap influence and good photoconductive performance. Overall, the results demonstrate that the fabricated device exhibits strong reverse-bias photocurrent generation, near-linear power sensitivity, and reliable optoelectronic performance, making it a promising candidate for high-performance photodetector and optical sensing applications.

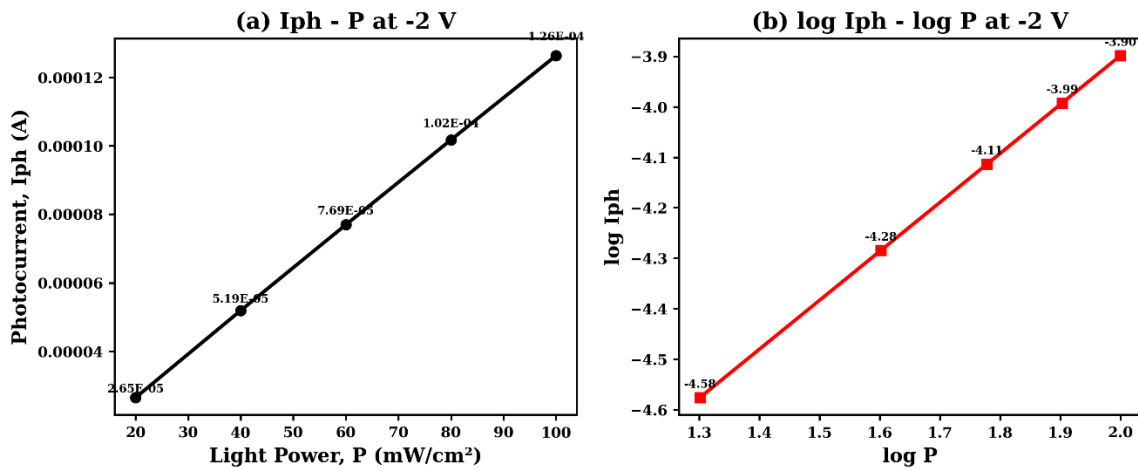


Figure 8. (a) Photocurrent versus light power density and (b) $\log I_{ph}$ versus $\log P$ characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode at -2 V.

Figure 9 shows the variation of responsivity of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode as a function of incident light power density under a reverse bias voltage of -2 V. Responsivity is one of the most important photodetector performance parameters, representing the electrical output current generated per unit incident optical power. The responsivity values were calculated using the relation (Ulutaş & Deniz, 2026):

$$R = I_{ph} / P_A \quad (3)$$

Thus, the calculated R values directly reflect the photo-conversion efficiency of the fabricated photodiode. As presented in Figure 9(a), the responsivity increases systematically with increasing light power density from 20 to 100 mW cm⁻². This trend indicates that the Gelatin:Ag NP interfacial layer effectively enhances photon absorption and facilitates efficient separation and transport of photogenerated charge carriers (Erdoğan, et. al. 2025). The gradual increase in R also suggests that carrier recombination losses remain limited over the investigated illumination range and that the device preserves stable photoresponse behavior at higher optical powers. The improved responsivity can also be associated with the presence of embedded Ag nanoparticles, which may contribute through LSPR. The plasmonic enhancement can increase local electromagnetic field intensity near the semiconductor interface, resulting in stronger light harvesting and more efficient carrier generation (Chaib, et. al. 2026). Figure 9 (b) presents the $\log R$ versus $\log P$ plot used to evaluate the power-law

dependence of responsivity. The experimental data exhibit excellent linearity and follow the expression:

$$R = BP^\beta \quad (4)$$

where B is a proportionality constant and β is the slope of the fitted line. From the linear fit, the exponent was determined as: $\beta = 0.42$. The positive β value confirms that responsivity increases with incident power density. This behavior indicates that the rate of photocurrent generation increases more rapidly than the increase in optical input power over the measured range. Such a trend may arise from progressive trap filling, improved carrier collection efficiency, and activation of additional transport pathways at higher illumination intensities (Enis, et. al. 2025). A β value lower than unity also implies that the responsivity enhancement occurs in a controlled and stable manner rather than through abrupt nonlinear gain processes. Therefore, the obtained result demonstrates balanced photoconductive amplification together with good operational stability (Abbas, et. al. 2025). Overall, the results confirm that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode exhibits increasing responsivity with light intensity, reliable power-dependent behavior, and efficient photoelectric conversion characteristics.

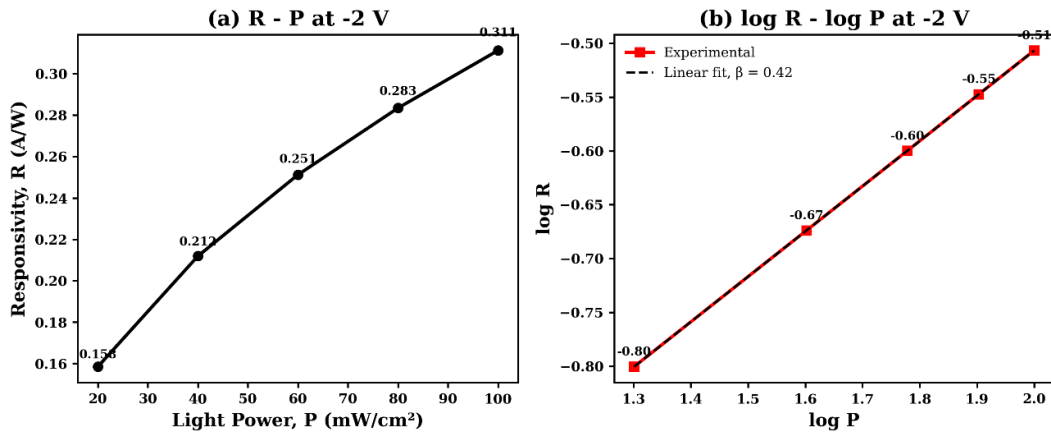


Figure 9. (a) Responsivity versus light power density and (b) logR versus logP characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode at -2 V.

Figure 10 illustrates the variation of the specific detectivity (D^*) of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode as a function of incident light power density under a reverse bias voltage of -2 V. Specific detectivity is one of the most important performance parameters of photodetectors, describing the ability of a device to detect weak optical signals in the presence of electrical noise. A higher D^* value indicates superior sensitivity and lower noise-limited detection threshold. The D^* values were calculated using the standard relation (Soylu, et. al. 2025):

$$D^* = \frac{R\sqrt{A}}{\sqrt{2qI_{dark}}} \quad (5)$$

Therefore, the calculated D^* values reflect the combined effects of photoresponse efficiency and electrical noise behavior of the fabricated photodiode. As shown in Figure 10(a), the specific detectivity increases systematically with increasing light

power density, reaching the order of 10^{13} Jones at high illumination levels. This trend demonstrates that the device not only generates higher photocurrent under stronger illumination but also preserves favorable signal-to-noise characteristics. The increasing detectivity confirms that the Gelatin:Ag NP interfacial layer effectively enhances carrier generation, suppresses recombination losses, and supports stable reverse-bias operation (Olkun, et. al. 2024). The improved D^* values may also be related to the plasmonic contribution of Ag nanoparticles dispersed in the gelatin matrix. LSPR can enhance optical absorption and increase the local electromagnetic field near the semiconductor interface, thereby promoting more efficient photocarrier generation and extraction (Murugan, et. al. 2025). Figure 10(b) presents the $\log D^*$ versus $\log P$ relationship, which follows the empirical power-law expression:

$$D^* = CP^\gamma \quad (6)$$

where C is a proportionality constant and γ is the slope of the fitted line. From the linear fitting of the experimental data, the exponent was determined as: $\gamma=0.36$. The positive γ value confirms that the detectivity increases with incident optical power. This behavior suggests that the gain in photocurrent and responsivity exceeds the influence of dark-noise components over the investigated illumination range (Talebi & Eshghi, 2024). A moderate γ value also indicates stable and controlled detectivity enhancement rather than abrupt nonlinear amplification. Overall, the obtained results reveal that the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode exhibits high specific detectivity, excellent power-dependent sensitivity, and reliable low-noise photoresponse behavior (Alarabi, et. al. 2025). These findings indicate that the fabricated device is a promising candidate for advanced photodetection, optical communication, and low-intensity sensing applications.

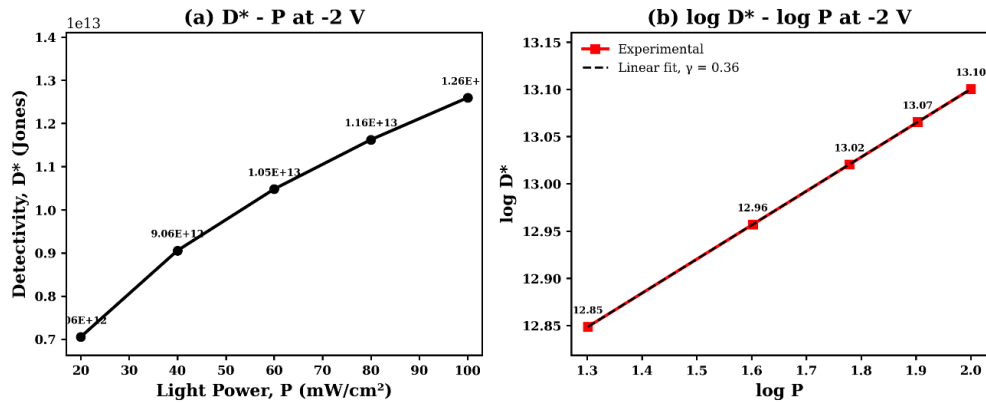


Figure 10. (a) Specific detectivity versus light power density and (b) $\log D^*$ versus $\log P$ characteristics of the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode at -2 V.

Conclusions

A multifunctional Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al hybrid bio-nanocomposite photodiode was successfully fabricated using a simple and cost-effective solution-assisted process. Structural and morphological analyses confirmed the homogeneous dispersion of crystalline Ag nanoparticles within the gelatin matrix, providing a suitable

multifunctional interfacial layer for optoelectronic applications. Optical measurements revealed strong UV absorption, a distinct plasmonic absorption band near 410 nm, and a direct optical band gap of 3.21 eV. Electrical measurements demonstrated that the fabricated device exhibited clear rectifying characteristics and strong photoresponse under different illumination intensities. The reverse-bias photocurrent increased significantly with increasing light power density, indicating efficient photogenerated carrier separation and collection. Thermionic emission and Cheung analyses revealed illumination-induced transport modulation, where the ideality factor increased and the barrier height decreased with increasing light intensity. The device also showed enhanced responsivity and high specific detectivity values in the order of 10^{13} Jones, confirming its excellent sensitivity toward weak optical signals. The nearly linear photocurrent-power relationship ($\alpha = 0.97$) and positive responsivity/detectivity exponents ($\beta = 0.42$, $\gamma = 0.36$) demonstrated stable and reliable power-dependent photodetection behavior. Furthermore, antibacterial experiments confirmed effective inhibition against both Gram-negative and Gram-positive bacteria, with the highest activity observed under UV illumination due to photoinduced ROS generation and plasmon-assisted Ag nanoparticle activation. In summary, the Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al photodiode combines sustainable materials, high photodetection efficiency, and light-assisted antibacterial functionality within a single platform. These results indicate that the proposed hybrid device is a strong candidate for future self-sterilizing sensors, biomedical optoelectronics, environmental monitoring systems, and advanced multifunctional photonic technologies. Unlike conventional silicon photodiodes reported in the literature, the present Au/Gelatin:Ag NP/p-Si/Al device uniquely combines sustainable bio-derived interfacial engineering, enhanced photodetection capability, and light-assisted antibacterial functionality within a single multifunctional platform.

Acknowledgments

The diode fabrication part of this study was financed from Hakkari University Scientific Research Projects budget numbered “FM26BAP1”

References

- Abbas, K., Ji, P., Ameer, M. F., Yang, S. 2025. Enhanced photoresponse and stability in graphene/silicon Schottky photodetectors modified with perovskite nanoparticles. *Applied Surface Science*, 714, 164485, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.164485>
- Agrawal, S., Parveen, A., Firoz, N., Tiwari, A., Bahadur, J. & Verma, K. 2025. Impact of Mg doping on optical, dielectric and antibacterial properties with in vitro analysis of CuAlO₂ spherical-flower nanostructures: Modeling and experimental results, *Journal of Alloys and Compounds*, 1044, 184471, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.184471>
- Alarabi, A. A., Çiçek, O., Makara, H., Ünal, F., Zurnacı, M. & Altındal, Ş. 2025. Enhanced sensing capabilities of UV–visible p-n and p-i-n photodiodes using

- unique layer and contact configurations. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 62, 101975, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.101975>
- Balasubramani, V., Chandrasekaran, C., Manikandan, V., Le, T. K., Marnadu, R. & Vivek, P. 2021. Upgraded photosensitivity under the influence of Yb doped on V₂O₅ thin films as an interfacial layer in MIS type Schottky barrier diode as photodiode application. *Journal of Solid State Chemistry*, 301, 122289, <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122289>
- Chaib, A., Amrani, M. & Benamara, Z. 2026. Optical response of Ag/poly-Si/ITO Schottky diodes under illumination: experiment and 2D modeling. *Micro and Nanostructures*, 212, 208578, <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2026.208578>
- Çaldıran, Z. Deniz, A. R., Sevim, M. & Aydoğan, Ş. 2021. The heterojunction diode application of mesoporous graphitic carbon nitride (mpg-C₃N₄). *Superlattices and Microstructures*, 157, 106991, <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106991>
- Çaldıran, Z. Taşyürek, L. B., Deniz, A. R. & Biber, M. 2025. Design and detailed electrical characterization of MoO₃ supported Au/n-Si junction diodes. *Micro and Nanostructures*, 205, 208217, <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2025.208217>
- Deniz, A. R. 2021. The analyzing of I-V performance of PbO₂/n-Si heterojunction in the wide temperature range. *Journal of Alloys and Compounds*, 888, 161523, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161523>
- Deniz, A. R. Çaldıran, Z., Yılmaz, Ş., Şinoforoğlu, M., Metin, Ö., Meral, K. & Aydoğan, Ş. 2013. The synthesis of the Fe₃O₄ nanoparticles and the analysis of the current-voltage measurements on Au/Fe₃O₄/p-Si Schottky contacts in a wide temperature range. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44, 3809-3814, doi: 10.1007/s11661-013-1716-9
- Dogru, N., Gurakar, S., Serin, T. & Yıldız, A. 2023. Comparative structure, optical and electrical characteristics of sol-gel-deposited In-, Ga-, and Sn-doped CuO thin films. *Materialia*, 32, 101970, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101970>
- Enis, O. N., Nadaroğlu, H., Güzeldir, B. & Sağlam, M. 2025. Study of how illumination affects the electrical properties of Al/n-gap Schottky diodes with varying amounts of Cu NCs-doped wm-cqd interlayer. *Physica B: Condensed Matter*, 717, 417776, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.417776>
- Erdoğan, M., Deniz, A. R. & Çaldıran, Z. 2025. Exploring photodiode characteristics of a D-π-D type organic semiconductor incorporating a fluorenyl π-bridge and triphenylamine donors. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 469, 116532, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2025.116532>
- Erdoğan, M., Deniz, A. R., Çaldıran, Z. & Acar, M. 2024. Investigation Of The Schottky Diode Performance of a new Diaminomaleonitrile-Based Organic Material with D-II-A Architecture. *ChemistrySelect*, 9(24), e202401181, <https://doi.org/10.1002/slct.202401181>
- Farbod, M., Taheri, R. & Kosarian, A. 2021. High performance photoresponsivity and high frequency of phosphorene/metal heterojunction as Schottky photodiode rectifier. *Applied Materials Today*, 24, 101092, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101092>
- Fidan, M., Ünverdi, Ö. & Çelebi, C. 2021. Junction area dependent performance of graphene/silicon based self-powered Schottky photodiodes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112829, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112829>

- Hemdani, A., Assaedi, H. & Rahmani, M. 2026. Enhancement of the electrical performance of Ag/P3DDT/macroporous silicon Schottky diodes through thermal annealing process. *Materials Science & Engineering B*, 327, 119312, <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2026.119312>
- Hinaz, F., Balasamy, S., Duraisamy, R., Ganapathy, D. & Sundramoorthy, A. K. 2026. Marine shell-derived hydroxyapatite/gelatine/chitosan/curcumin scaffolds for bone repair. *Next Research*, 8, 101643, <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2026.101643>
- Hussaini, A. A., Tok, M., Torlak, Y., Yenel, E., Durmaz, F., Kus, M. & Yıldırım, M. 2024. High responsivity and external quantum efficiency of polyoxometalate interlayered Schottky type photodiode device. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 172, 108094, <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.108094>
- Izmirli, S. & Cavdar, S. 2025. Effect of film thickness on photodiode and photodetector performance of titanium dioxide (TiO₂) prepared via solution assisted spin coating method. *Applied Surface Science*, 688, 162187, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.162187>
- Jiang, H., Chen, L., Hu, Y., Jiang, H., Liao, M., Shi, S., Qiu, X. & Lei, Y. 2024. Bio-inspired design of flexible semitransparent encapsulation toward self-cleaning and anti-reflective quantum dot light-emitting diodes. *Ceramics International*, 50, 18741-18749, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.362>
- Kaçuş, H., Deniz, A. R., Çaldıran, Z., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A. & Ekinici, D. 2014. The analysis of the current-voltage characteristics of the high barrier Au/Anthracene/n-Si MIS devices at low temperatures. *Materials Chemistry and Physics*, 143(2), 545-551, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2013.09.030>
- Karabulut, N., Aydın Demir, B., Karacali, T. & Gör Bölen, M. 2026. Effects of rapid thermal annealing in O₂ and N₂ ambients on the band gap and diode characteristics of porous silicon. *Optics and Laser Technology*, 199, 115091, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2026.115091>
- Karaca, A., Yıldız, D. E., Hussaini, A. A., Yıldırım, M. & Gündüz, B. 2026. Structural and photoelectrical properties of an MDMO-PPV/n-Si hybrid heterojunction photodiode for broadband detection. *Physica B: Condensed Matter*, 725, 418225, <https://doi.org/10.1016/j.physb.2025.418225>
- Koh, N. & Kim, D-K. 2025. Synergistic antibacterial effect of 405 nm blue light-emitting diodes (LEDs) and gelatin film for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella Typhimurium* on stainless steel and fresh fruit peel. *International Journal of Food Microbiology*, 427, 110961, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110961>
- Lee, Y., Kim, D. S., Jin, S. W., Lee, H., Jeong, Y. R., You, I., Zi, G. & Ha, J. S. 2022. Stretchable array of CdSe/ZnS quantum-dot light emitting diodes for visual display of bio-signals. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130858, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130858>
- Leelanarathiwat, K., Katsuda, Y., Katsuragi, H. & Watanabe, F. 2020. Antibacterial activity of blue high-power light-emitting diode-activated flavin mononucleotide against *Staphylococcus aureus* biofilm on a sandblasted and etched surface. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 31, 101855, <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101855>

- Murugan, A., Rohit, C., Fatehmulla, A., Priya, S., Han, S. S., Babu, S., Bharathkumar, S., Mohan, S. & Valdes, H. 2025. Harnessing the synergistic effect of CuO@Fe₃O₄/n-Si for high-efficiency photodiodes. *Journal of Physics and Chemistry of Solid*, 196, 112359, <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112359>
- Olkun, A. Kaplan, H. K., Akay, S. K., Ahmetoğlu, M., Pat, S. & Erdoğan, N. 2024. Narrow-band n-GaN/n-Si isotype heterojunction photodiode: A simplified approach for photodiode development. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 374, 115466, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115466>
- Orhan, Z., Kasapoğlu, A. E., Öztürk Doğan, H. & Daş, E. 2024. Investigation of the performance and stability of self-powered polythiophene-based photodiodes under UV and visible light illumination. *Sensors and Actuators: A. Physical*, 378, 115853, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115853>
- Sevinç, G., Orak, I. & Kocyigit, A. 2026. BODIPY and Aza-BODIPY based Schottky-type photodiodes for optoelectronic applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 184, 115975, <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115975>
- Soylu, M., Dere, A. & Yakuphanoglu, F. 2025. The photoresponse properties of nanostructured Cu: CdO thin film based photodiodes. *Micro and Nanostructures*, 204, 208155, <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2025.208155>
- Stanley, J., Poulain, C., Debeaufort, F., Brachais, C-H., Culliton, D., Benbettaieb, N., Jovani-Sancho, B-J & Neves, A. C. 2026. Material characterisation of bioplastics: Influence of different starch sources in fish gelatin-based blends. *Materials Today Sustainability*, 34, 101344, <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2026.101344>
- Talebi, S. & Eshghi, H. 2024. The n-MoO₃/p-Si heterojunction photodiode: Influence of the MoO₃ film thickness on the ultraviolet and infrared photodetector performance. *Optical Materials*, 157, 116080, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116080>
- Taşyürek, L. B., Aydoğan, Ş., Sevim, M. & Çaldıran, Z. 2022. Analysis of the temperature dependent electrical parameters of the heterojunction obtained with Au nanoparticles decorated perovskite strontium titanate nanocubes. *Journal of Alloys and Compounds*, 914, 165140, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165140>
- Ulutaş, C. & Deniz, A. R. 2026. Physical properties of α-MnS films synthesized by hydrothermal method and photodiode applications. *Applied Physics A*, 132, 273, <https://doi.org/10.1007/s00339-026-09471-9>
- Uzun, İ., Orak, İ., Sevgili, Ö. & Karakaplan, M. 2026. Characterization and photodiode applications of walnut husk extract and of metal juglonate complexes synthesized using this extract. *Materials Science & Engineering B*, 329, 119370, <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2026.119370>
- Yao, J., Huang, L., Li, Y., Liu, Jia., Liu, Ju., Shu, S., Huang, L. & Zhang, Z. 2022. Facile synthesizing Z-scheme Bi₁₂O₁₅C₁₆/InVO₄ heterojunction to effectively degrade pollutants and antibacterial under light-emitting diode light. *Journal of Colloid and Interface Science*, 627, 224-237, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.07.026>
- Yeşildağ, A., Erdoğan, M., Sevgili, Ö., Çaldıran, Z. & Orak, İ. 2021. Optical and Electrical Properties of Pyrene-Imine Organic Interface Layer Based on p-Si. *Journal of Electronic Materials*, 50:6448–6458, <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09178-y>

Multi-Input AND Gate for Physical Measurement and Triggering

Emine Canan Günay Demirel

Çanakkale Onsekiz Mart University, Çanakkale Technical Sciences Vocational School, Department of Electricity and Energy, Çanakkale, Türkiye
e-mail: ecanan@comu.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1946386

Geliş tarihi/Received: 07/05/2026

Kabul tarihi/Accepted: 29/06/2026

Abstract

In this study, a NodeMCU-based, web-controlled, and dynamically configurable multi-input AND gate platform was developed and evaluated experimentally. The system consists of eight independent AND gates, each configurable between 2–128 inputs. Users can define inputs and inter-gate connections via the web interface; the selected gate is evaluated through client-side logical updating, while the NodeMCU performs the measurement routine and server-side request handling. In addition, microcontroller processing time (μ s) and end-to-end total time (ms) were examined together. The results, based on a total of 1280 measurement records, showed that the NodeMCU-side measured processing time steadily increased as the number of inputs increased. The mean time was 149.71 μ s for 2 inputs and 15895.09 μ s for 128 inputs; the linear fit coefficient was $R^2 = 0.971$. The findings demonstrate a small-scale experimental study of the physical measurement and data-processing behavior of the developed platform.

Keywords: NodeMCU, Logic, AND gate, data analysis

Fiziksel Ölçüm ve Tetikleme için Çok Girişli VE Kapısı

Özet

Bu çalışmada, NodeMCU tabanlı, web kontrollü ve dinamik giriş sayısına sahip çok portlu bir VE kapısı platformu geliştirilmiş ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. Sistem, her biri 2-128 giriş arasında yapılandırılabilen sekiz bağımsız VE kapısından oluşmaktadır. Kullanıcılar, web arayüzü üzerinden girişleri ve kapılar arasındaki bağlantıları tanımlayabilir; seçilen kapı istemci tarafındaki mantıksal güncelleme ile değerlendirilirken NodeMCU ölçüm rutinini ve sunucu tarafı istek işleme sürecini gerçekleştirir. Ek olarak, mikrodeneleyici işlem süresi (μ s) ve uçtan uca toplam süre (ms) birlikte incelenmiştir. Toplam 1280 metrik kayda dayalı sonuçlar, NodeMCU tarafında ölçülen işlem süresinin giriş sayısı arttıkça sürekli olarak arttığını göstermiştir. Ortalama süre 2 girişte 149,71 μ s ve 128 girişte 15895,09 μ s olmuştur; doğrusal uyum katsayısı $R^2 = 0,971$ 'dir. Bulgular, geliştirilen platformun fiziksel ölçüm ve veri işleme süreçlerinin küçük ölçekli deneysel bir çalışmasını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: NodeMCU, Mantık, VE kapısı, veri analizi

Introduction

Digital logic gates are one of the fundamental processing units in the background of modern physics experiments. Although a logic gate is considered as a decision structure based on two logical values, 0 and 1, at the abstract level, it plays a functional role in many physical processes such as triggering, data selection, event verification, event time recording, threshold value control, and real-time control (Pásztor, 2022; Nash et al., 2024; Galli et al., 2019; Khachatryan et al., 2017). Direct technical counterparts of this logic are seen in structures such as particle detector electronics,

front-end processing, discriminators, time-digital converters, and trigger decision circuits (Riu, 2017; Nessi et al., 2003; Ambrosi et al., 2021; Spieler, 2003).

In particle physics, processing data from many detectors in a short time, maintaining system stability in gravitational wave detectors, and maintaining data quality at high count rates in nuclear spectroscopy are important technical requirements. Digital logic and embedded or programmable hardware structures play an important role in meeting these requirements (Sullivan et al., 2023; Bartos et al., 2010; Yii et al., 2009; Zeynalova et al., 2009). FPGA-based solutions are widely used in physics infrastructures due to low latency, high parallelism, and reconfigurability (Wirthlin, 2015; Summers et al., 2024; Duarte et al., 2018).

Within this framework, multi-input AND gate constructs are not just abstract instances that can be considered at the truth table level but are logical decision constructs that oversee the simultaneous fulfillment of multiple conditions. These structures, which control the provision of all conditions at the same time, play an important role in processes such as event acceptance, co-evaluation of multiple conditions, monitoring of safety states, synchronization and verification of trigger conditions in physics experiments (Nessi et al., 2003; Mizukami, 2020; Hennig ve Hoover 2021; Real et al., 2026). Therefore, studying multiple-input AND logic on an experimental and measurable platform is meaningful not only in terms of numerical design but also in terms of understanding physical decision structures (Hennig et al., 2018; Livingstone et al., 2021).

The main objective of this work is to realize the multiple-input AND logic on a web-based, reconfigurable, and experimentally measurable useful platform. Thus, the conceptual relationship between the calculation behavior of the system and the physical measurement and triggering processes becomes more concretely discussable. The developed system departs from classical fixed-input logic structures and offers a wider experimental investigation area with eight independent gates, each configurable between 2–128 inputs (Chowdhury et al., 2020; ATLAS Collaboration, 2024).

Uses of Digital Logic Gates in Physics

The use of digital logic gates in physics often does not appear as a direct logic gate; However, many functions such as triggering, event selection, data framing, time matching, and evaluation of control conditions are based on logical operations. Accordingly, some example areas reflecting the role of digital logic in physical measurement and control infrastructures are discussed below (Bianchini et al., 2018; Milshtein, 2023; Harmand et al., 2013).

Triggering and event selection in particle physics

One of the key requirements in high-energy physics experiments is that the large data stream from the detectors must be processed in very short periods of time, and only physically meaningful events must be recorded. For this purpose, first-level trigger systems evaluate the information coming from many detectors with fixed-latency logical decision mechanisms (Pásztor, 2022; Nash et al., 2024; Nessi et al., 2003; Mizukami, 2020; Chowdhury et al., 2020). CMS Phase-2 Level-1 trigger architecture and ATLAS Level-1 trigger structure are the strongest examples of this approach in terms of selecting events within short delays and combining information from

subsystems into a central decision structure (Galli et al., 2019; Khachatryan et al., 2017; ATLAS Collaboration, 2024).

In such systems, AND, OR, and more complex logical join blocks do not remain just a numerical abstraction; they also function as the basic components of hardware decision structures that determine the conditions under which a physics event will be accepted (Riu, 2017; Nessi et al., 2003; Wirthlin, 2015; Summers et al., 2024). In addition, in current trigger systems, low-latency machine learning applications running within the FPGA have become a part of real-time event selection in addition to classical logic blocks (Duarte et al., 2018).

Gravitational wave detectors and real-time control

Gravitational wave detectors are systems in which extremely small displacements are measured and closed-loop control is critical. In the technical documents published on the Advanced LIGO timing system, it is stated that UTC-compliant timestamps, time distribution infrastructure, and secondary timing mechanisms for diagnostic purposes are the basic components of the system (Sullivan et al., 2023; Bartos et al., 2010). This structure is essential not only for data recording but also for accurate timing of physical events and consistent decision generation across subsystems (Yii et al., 2009).

Within this framework, digital logic gates and their combinations on the FPGA play crucial roles not only for data routing purposes but also in realizing functions such as locking processes, control stability, and real-time physical measurement feedback (Zeynalova et al., 2009; Hennig et al., 2018; Livingstone et al., 2021). This assessment shows that logic structures in high-precision measurement systems cannot be considered separately from the control infrastructure (Milshtein, 2023).

Nuclear spectroscopy and digital pulse processing

In the technical documents published by the International Atomic Energy Agency, it is emphasized that the transition from analog processing chains to digital pulse processing approaches in nuclear spectrometry systems has achieved significant gains (Yii et al., 2009; Zeynalova et al., 2009). Thanks to digital pulse processing, higher data processing capacity can be achieved, more stable operating conditions can be provided against temperature and noise changes, and system performance can be maintained at high counting rates (Harmand et al., 2013; Lemke et al., 2015).

In this field, digital logic blocks are used in functions such as decision-making based on threshold value, defining time windows, defining concurrent event conditions, framing data, and event acceptance. Therefore, multi-input logic constructs are directly related to physical requirements based on the combined evaluation of multiple conditions, especially in multi-channel nuclear measurement setups (Hu et al., 2023; Bui et al., 2022). Assessments of FPGA use in the nuclear field also support this trend (Liu et al., 2024).

Synchronization and co-triggering in distant detector systems

As radiation detectors physically move away from each other, it becomes more difficult to reliably and simultaneously distribute clock signals and trigger signals throughout the system. Studies on White Rabbit-based radiation detector readout

electronics have shown that high-precision recording of event times, collection of multi-channel data, and subsequent pulse processing functions are integrated on FPGA-based hardware (Hennig ve Hoover 2021; Real et al., 2026). In addition, White Rabbit-based time stamping cards allow the recording of trigger signals with near-nanosane accuracy (Champion et al., 2017).

In such systems, logic gates undertake essential functions in terms of determining whether signals from different detectors are related to each other in terms of time and, accordingly, producing a common trigger decision. Software triggering and timestamped event matching approaches can be considered as the physical counterpart of multi-conditional AND logic (Hennig et al., 2018; Livingstone et al., 2021; Champion et al., 2017).

Photon science, accelerators and atomic time

In technical studies on SLAC and free-electron laser infrastructures, FPGA-based data acquisition systems, femtosecond-scale timing tools, high-bandwidth control structures, and concurrent data acquisition infrastructures are discussed in detail (Bianchini et al., 2018; Milshtein, 2023). Beam arrival time tracers and LCLS-II timing architecture clearly demonstrate the critical role of digital timing and triggering structures in high-precision photon science experiments (Harmand et al., 2013; Lemke et al., 2015).

Similarly, in studies on precision time and frequency systems, it is seen that FPGA-based numerical control structures undertake tasks such as temperature control, phase locking, automatic tuning, and time reference generation (Hu et al., 2023; Bui et al., 2022; Liu et al., 2024). This suggests that digital logic functions directly not only in particle physics and detector systems, but also in atomic time and frequency infrastructures (Bui et al., 2022; Liu et al., 2024).

Materials and Methods

Multi-Input AND Gate Design

The AND gate is a fundamental combinatorial circuit element of digital logic, a decision structure that produces an output of 1 only if all inputs are logically 1 simultaneously (Roth et al., 2004). The system consists of an ESP8266-based web server and a client-side HTML/CSS/JavaScript interface. Fixed IP configuration was made on the NodeMCU side, the HTTP server was started on port 80, and the home page and measurement requests were served through separate endpoints.

A total of eight gates are defined in the interface layer. The number of inputs for each gate can be selected from 2 to 128. Since inputs can be fed from basic variables or outputs of other gates, the system supports not only independent gates, but also the modeling of composite logic structures.

On the client side, gate configurations and input states are kept in browser-based local storage. This preference allows the user configuration to be preserved in case the page is reopened. However, this structure does not rely on a server-side database, so it is treated as a local storage mechanism that depends on the device and browser.

In addition, Start Measurement, End Measurement, Clear Measurement buttons have been added to the interface layer of the system. Thus, it is ensured that the periods

from the moment the data is applied to the gate inputs to the moment the result is obtained are recorded in a table. The gate number to be measured can also be selected.

Logical outputs are calculated in multiple rounds on the client side. The structure used in the code performs successive updates to allow inter-gate dependencies to reach a stable state. While this approach is practical and functional, it is more of an engineering-based convergence approach than an algorithm that provides precise verification for all possible cyclic connections.

In this context, the NodeMCU time reported in this study should not be interpreted as the execution time of a bare Boolean AND operation alone. During a measurement request, the ESP8266 also receives the HTTP request, parses the textual URL and parameter information, processes the selected gate/input configuration, executes the measurement routine, generates the response content, and returns this response to the client. Therefore, the measured NodeMCU time represents the embedded web-server and request-processing load associated with the configurable AND logic, rather than only the raw logical operation.

Visual Presentation of the Startup Interface

The image of the startup interface seen when first connecting to the system is given in Figure 1. In this screenshot, eight two-input AND gates, input variables, and output variables appear simultaneously. The input variables of the gates can be selected as desired.

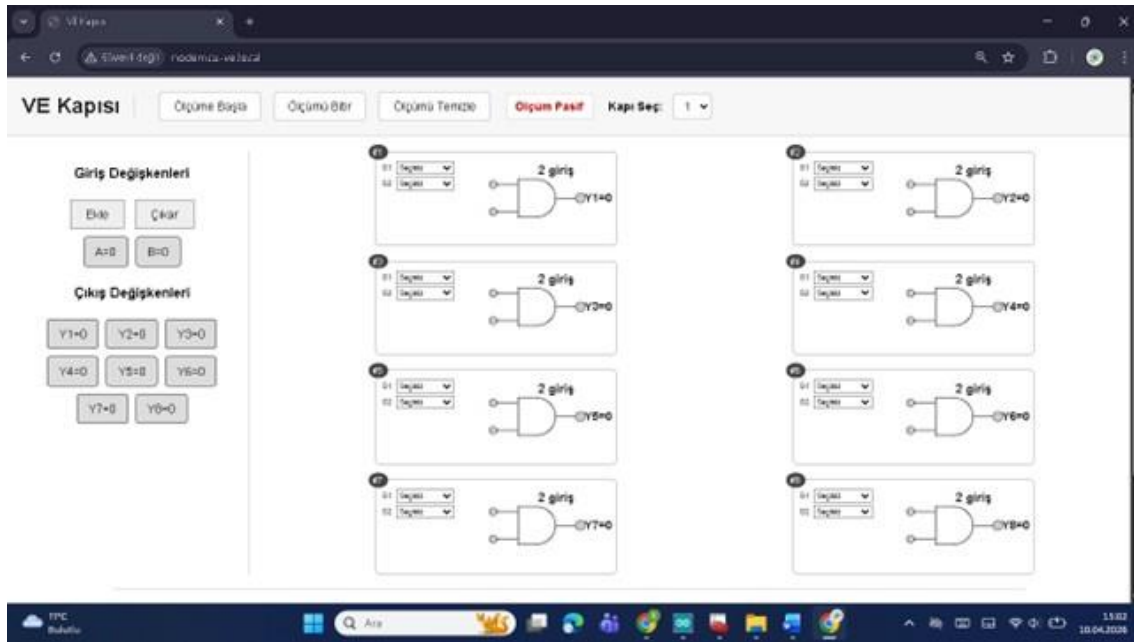


Figure 1. Startup screen when first connecting to the system: eight two-input AND gates, input variables, and output variables.

Selecting the Number of Inputs per Gate

The number of inputs for each gate can be selected between 2 and 128, which forms the basis of the parametric and reconfigurable structure of this study. Figure 2

shows the input-number selection options for gate 1. This image shows that, unlike the classical logic gate approach with fixed input, the user can define AND gates of very different sizes through a single interface.

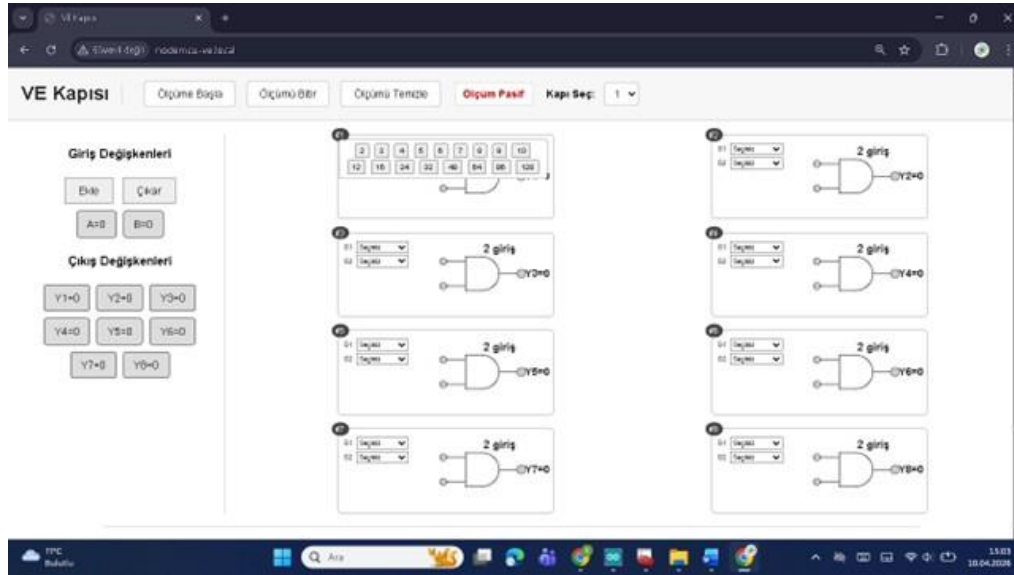


Figure 2. User selection of the number of inputs per gate.

Modifying Input Variables

Changing the basic input variables between 0 and 1 is one of the basic operations that reveals the dynamic nature of the system. For this reason, the screenshot show changing the values by clicking on the input boxes is shown in Figure 3. This figure illustrates that the interface is not just a static representation but offers a layer of control that operates in real-time with user interaction.

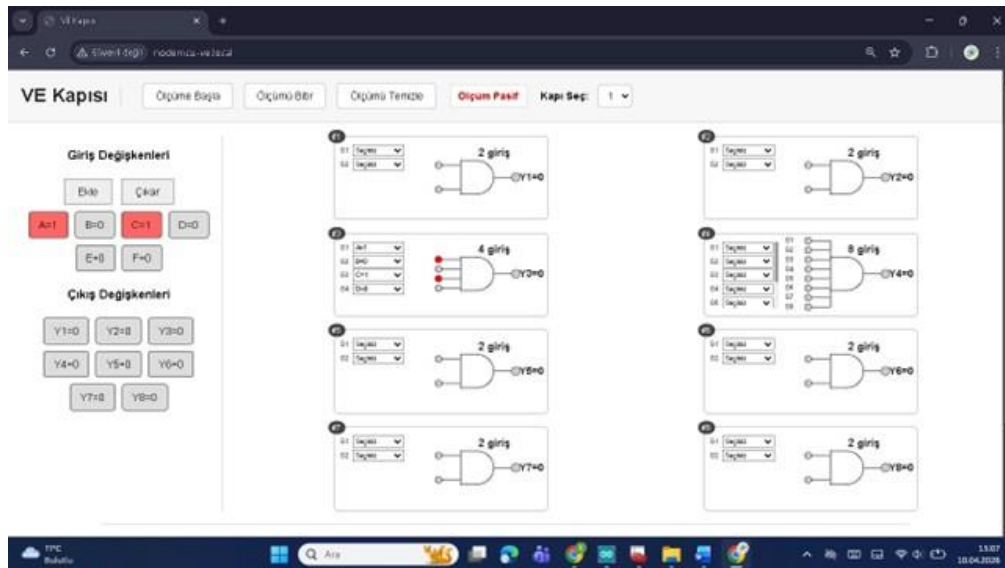


Figure 3. User-modification of input variables and updating of the interface.

Visualization of Input-Output Behavior

In Figure 4, the instantaneous update of the output variables depending on the change in the input variables is given. Here, it is seen how the output states change in terms of color and value, especially depending on the selected inputs. This image can be shown as an example of how the truth table logic reveals its real-time counterpart on the interface.

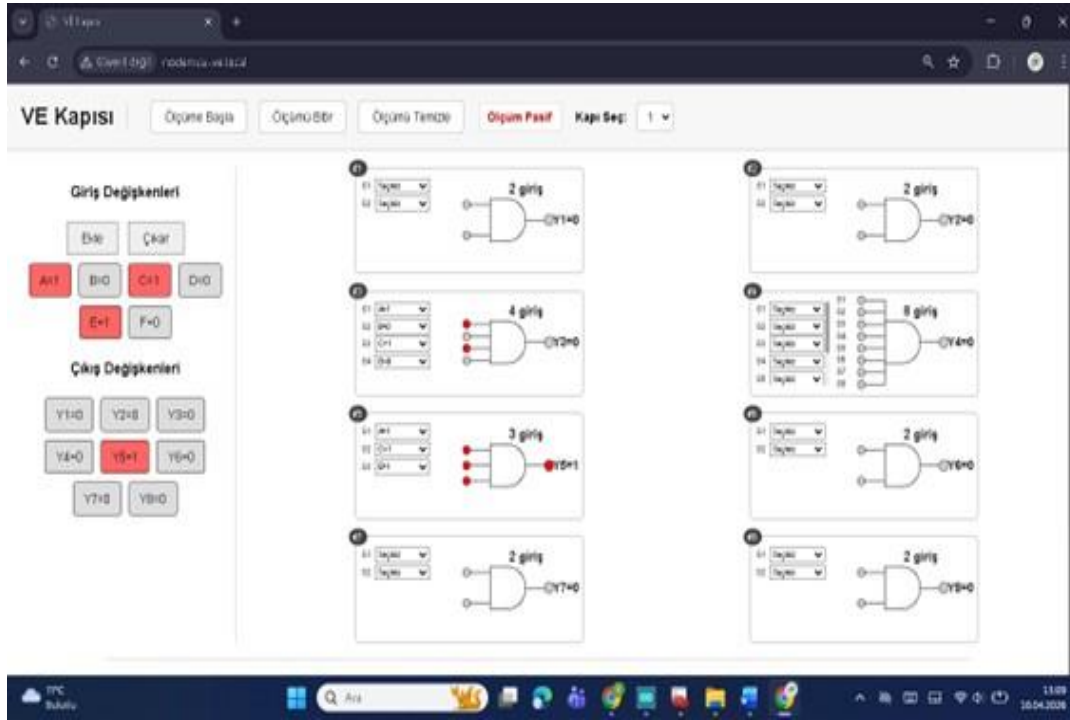


Figure 4. Instant updating of output variables depending on the change in input variables.

Program Flow Diagram

The program flow diagram of the software developed is given in Figure 5.

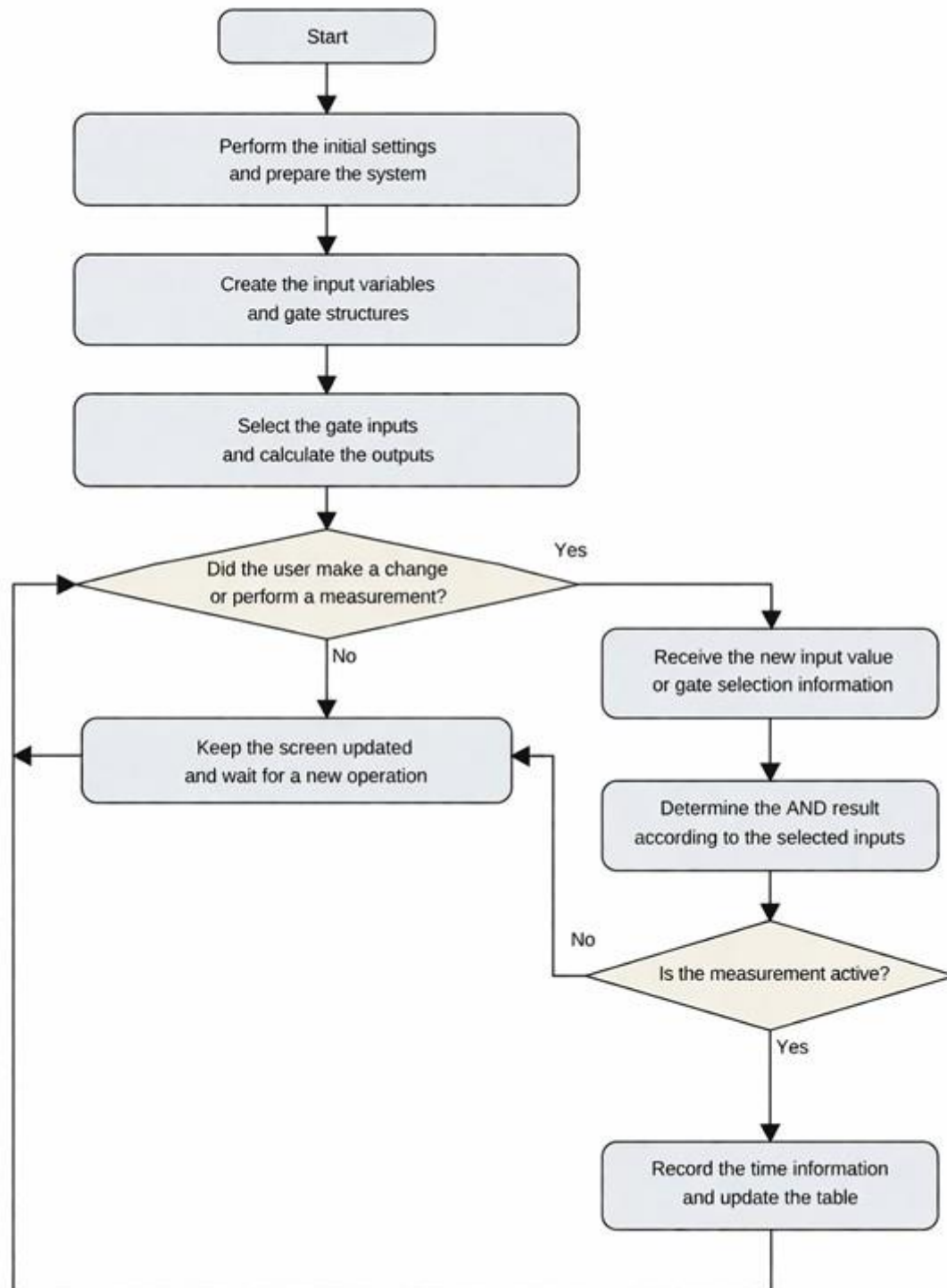


Figure 5. General program flow diagram of the ESP8266-based system.

Measurement Interface and Data Logging Mechanism

In the developed system, the measurement process is managed through the control buttons on the user interface. This structure makes it possible to use the system not only as a simulation tool that generates logic output, but also as a measurement platform that generates experimental data.

When the "Start Measurement" button on the interface is activated, the system switches to measurement mode. If the measurement mode is on, the time measurement is automatically started after every change made by the user to the input variables or every update made to the gate configuration and the results obtained are added to the measurement table. This approach ensures that data production is carried out systematically and independently of user interpretation.

When the "End Measurement" button is used, the system exits the measurement mode and new measurement records stop being added to the table. Thus, after a certain set of experiments is completed, the data series can be fixed, and the measurements of different experimental conditions are prevented from being mixed with each other.

The "Clear Measurement" button deletes all records in the existing measurement table, creating a clean starting environment for a new series of experiments. Especially when collecting data repeatedly for different gate numbers or different input numbers, this button plays a functional role in separating the experimental blocks.

During the measurement, each record is automatically added to the table as a row. Table columns; It consists of measurement number, gate number, number of inputs, total time (ms) and NodeMCU time (μ s) information. Thus, the user can monitor directly on the table which gate and under which input level the experiment was carried out.

With the "Copy Table" button on the interface, measurement results can be copied to the clipboard and transferred directly to spreadsheet software such as Excel. With the "Save Table" button, all measurement data is exported as a file in CSV format. This feature ensures that the raw data can then be reused in statistical analysis, graphic production, and article writing processes.

This data recording mechanism makes the experimental aspect of the developed platform evident. Because the system does not only visualize multi-input AND logic; At the same time, it generates reproducible time data depending on the experimental conditions selected by the user and stores this data in a form that can be transferred to external analysis environments.

Measurement Methodology

Two different time scales were examined in the study. The first is the total time between initiating the request sent from the client to NodeMCU and receiving the response, measured in milliseconds. This magnitude includes not only the computation time but also client-side preparation operations, data transmission over the network, network latency, and server-side response process.

The second time magnitude is the NodeMCU-side processing time, which is measured within the microcontroller-side measurement endpoint. This interval should not be interpreted as the bare execution time of a single Boolean AND operation or as the propagation delay of a hardware logic gate. In the implemented ESP8266 web-

server architecture, the measured interval also includes receiving and parsing the HTTP request, interpreting textual parameters that represent the selected gate/input configuration, executing the measurement routine, and producing the server response. Therefore, this value represents the software and embedded web-server processing load required to realize and measure the configurable AND logic on the microcontroller.

In the measurement experiments, inputs that were not selected by the user were processed as logic 0 by the system. This rule was adopted as a deliberate fail-safe and pedagogical design choice: a channel that is not explicitly selected by the user is treated as inactive and suppresses output generation. In real physical trigger architectures, unused channels may instead be treated as don't-care conditions or pulled to logic 1 so that they do not force the overall AND output to 0. Therefore, the present implementation should be read as an educational and conservative modeling choice rather than a universal rule for all detector-trigger infrastructures. Since the focus of this study is on time behavior, the effect of the number of inputs on the measured processing time rather than the logical output of the input pattern was evaluated.

Experimental Layout and Data Set

The experimental data set was obtained at input levels 2, 4, 8, 16, 32, 64, 96, and 128 for a total of eight gates. Twenty repeat measurements were taken for each gate and input-number combination; thus, a total of 1280 records were produced.

This design allows comparison of both the effect of the number of inputs on the processing time and the magnitude of possible differences between gates. The CSV file provided by the user was processed, the formal decompositions in the total time column were converted into a numerical solution, and the dataset was made ready for statistical analysis.

Results and Discussion

The overall analysis shows that as the number of inputs increases, the processing time of the NodeMCU increases steadily and strongly. In Table 1, all findings are collected together and basic statistics are given according to the number of inputs.

Table 1. Findings depending on the number of inputs.

Number of inputs	Number of measurements	Avg. NodeMCU (μ s)	Std. NodeMCU	Avg. total (ms)	Median total (ms)
2	160	149.71	9.02	111.83	21.80
4	160	205.93	9.47	77.67	19.95
8	160	343.56	11.47	40.90	20.80
16	160	659.74	14.38	35.85	20.80
32	160	1671.42	16.75	80.64	26.50
64	160	5246.68	21.18	51.12	35.60
96	160	10895.27	22.84	62.58	48.35
128	160	15895.09	20.82	77.13	60.95

When Table 1 is examined, it is seen that the average NodeMCU time is 149.71 μ s in 2 inputs, while this value is 15895.09 μ s in 128 inputs. This increase indicates that the calculation time increases significantly depending on the number of inputs of the system.

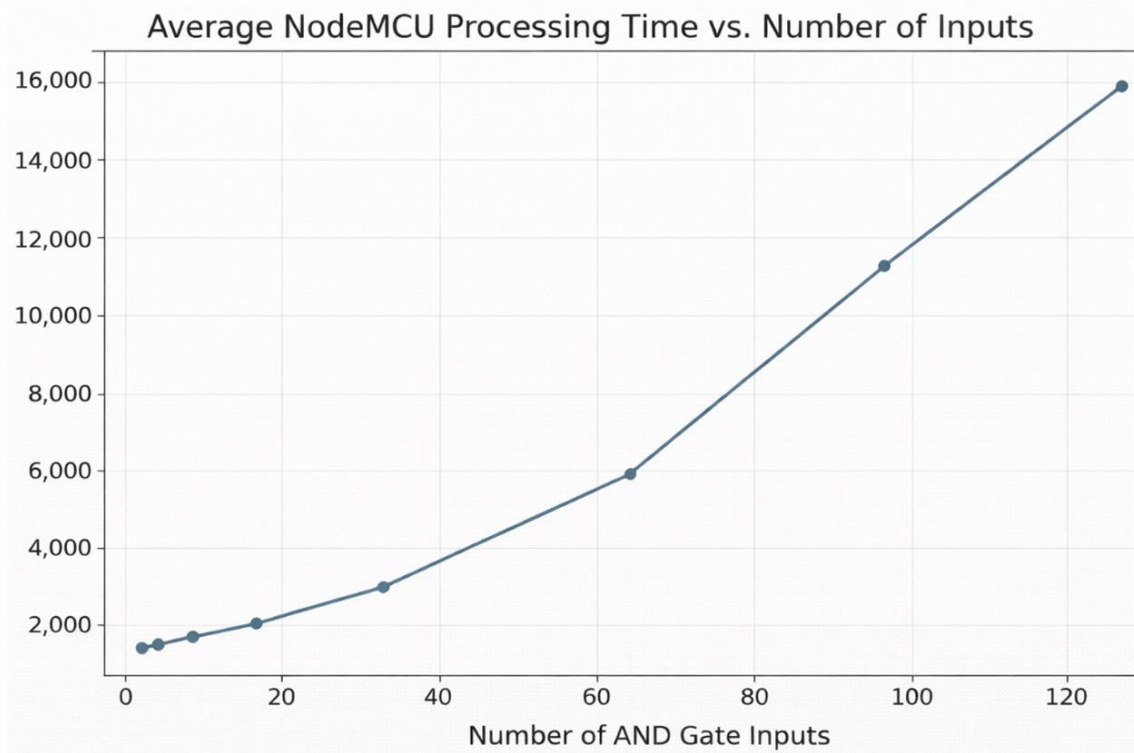


Figure 6. Average NodeMCU processing time based on the number of inputs.

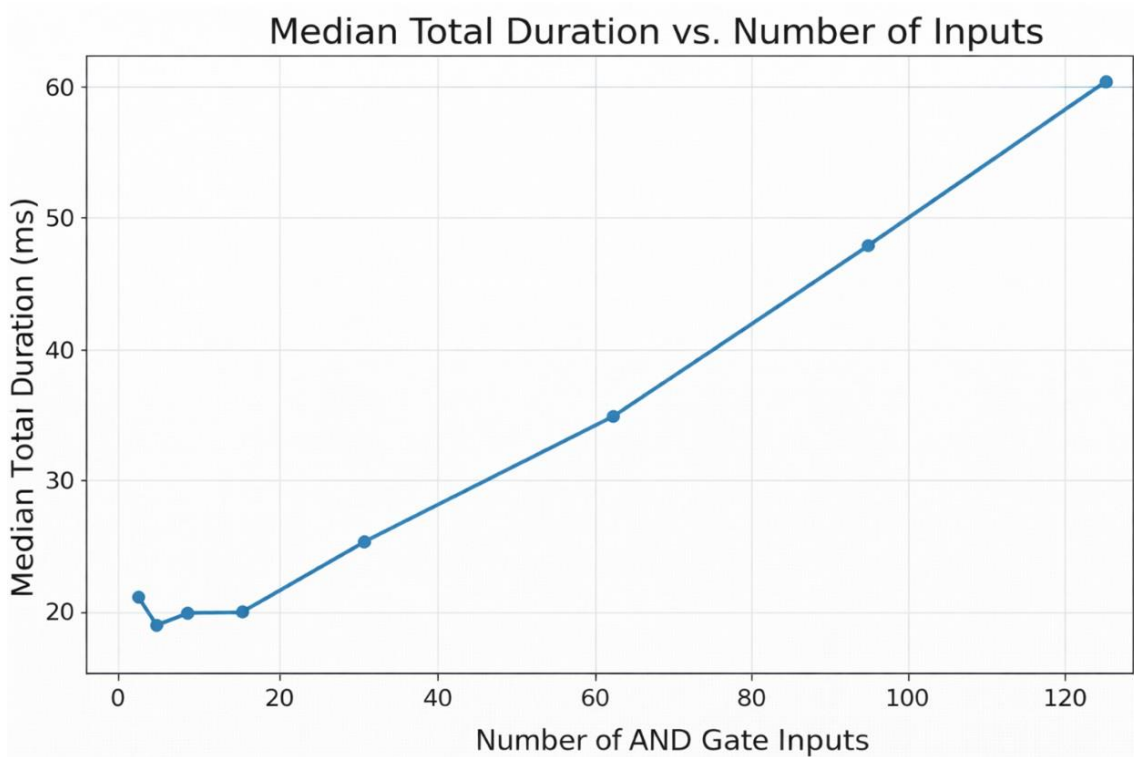


Figure 7. The median value of the total times measured for each number of inputs

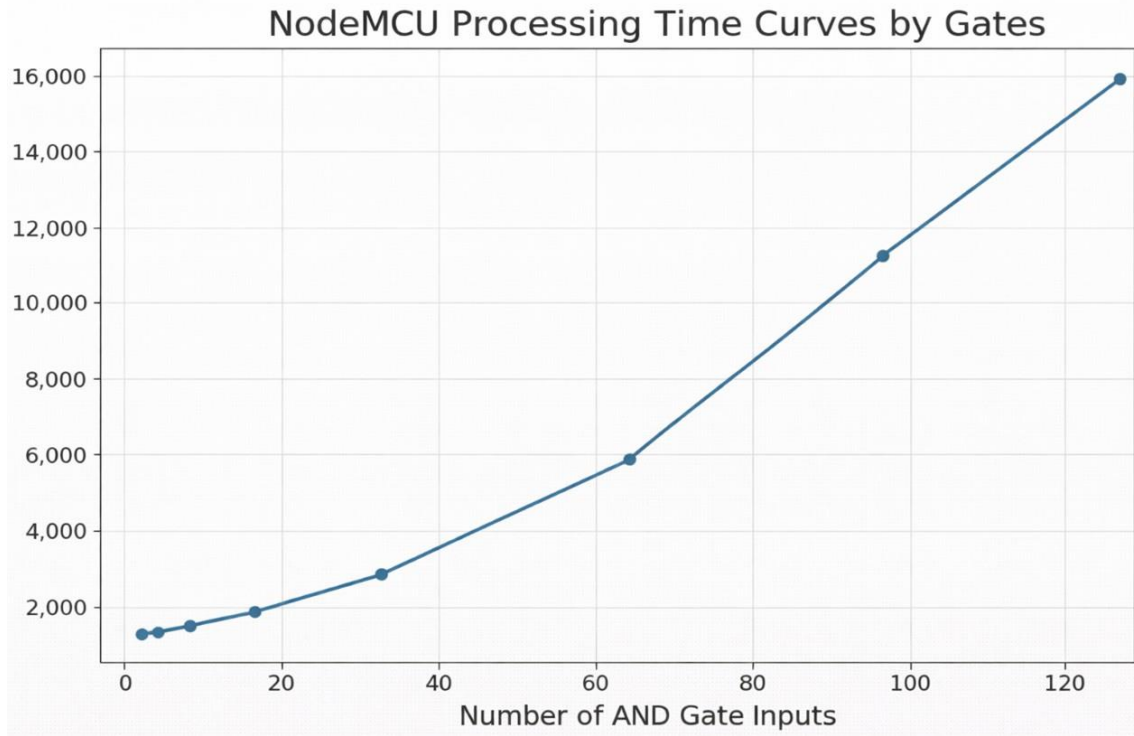


Figure 8. Average NodeMCU time curves by gates.

The coefficient of fit for the linear model established between the mean NodeMCU time and the number of inputs was found to be $R^2 = 0.971$. This value shows that the computational behavior of the system based on the number of inputs is quite regular.

When the curves are examined according to the gates, it is seen that there are only small differences between different gates at the same input level. This supports the fact that the measurements are determined by the number of inputs rather than the gate number and that the experimental setup is reproducible.

The total time data behaved more variably than the NodeMCU time. Singular high values were observed especially at some low and mid-input levels. This means that the total time is not only the NodeMCU-side measured processing time; it can be explained by the fact that it also reflects the effects of browser processing, network latency, HTTP transport, and the operating system scheduler.

The findings obtained from this table allow important physical and computational inferences to be made regarding the time behavior of the system.

The relationship between the increase in the number of inputs and the NodeMCU-side measured processing time is approximately linear, indicating that the system's measured software and web-server processing load increases steadily depending on the number of inputs. This behavior should not be interpreted as the time required for a bare 128-input Boolean AND calculation on an 80 MHz ESP8266 processor. Rather, it reflects the combined effect of processing the input configuration, handling HTTP/textual request data, executing the measurement routine and evaluating the performed AND operation for the selected inputs. In this respect, the software loop and request-processing structure of the platform exhibit an approximately linear scaling behavior.

When evaluated in terms of physical systems, this result is similar to the behavior of triggering systems that require multiple conditions. Especially in the triggering mechanisms used in particle physics, many signals must be validated simultaneously for the event to be accepted. The increase in the number of inputs in such structures may prolong the decision-generation process, and this tendency is represented experimentally in this study through the scalable software model.

Another important distinction concerns unused or unselected channels. In practical detector and trigger systems, channels that are not included in a given trigger mask can be defined as don't-care inputs or held at logic 1 so that they do not suppress the coincidence condition. In the present platform, however, unselected inputs are intentionally modeled as logic 0 to make the user-defined participation of each channel explicit and to represent an inactive channel as a safe blocking condition. This choice improves the educational visibility of the interface, although it differs from some high-performance trigger masking implementations.

Examining the standard deviation values, it is evident that the NodeMCU duration generally exhibits stable behavior, but minor fluctuations occur as the number of inputs increases. This suggests that with the increasing processing intensity on the microcontroller, timing precision may be affected to a limited extent.

A mean and median comparison of the total time values makes it clear that the system is susceptible to network-based delays. The median values are lower and more stable than the mean, indicating that extreme values affect the measurement results. Such deviations can be attributed to delays, especially due to wireless communication, browser processing times, and the HTTP protocol.

In this context, the difference between NodeMCU time and total time represents two fundamental concepts encountered in physical measurement systems: intrinsic transaction latency and system-level latency. This distinction is also critical in large-scale physics experiments. For example, in triggering systems, not only the calculation time of the algorithm, but also the data transfer time and synchronization delays determine the total performance.

In conclusion, this table shows that the developed system is not only a digital logic application but also provides an experimental platform that allows observing the basic behaviors of physical measurement and data processing processes through a small-scale model.

The findings reveal that the developed system is meaningful in terms of showing how the logical processing load scales on a low-cost embedded platform, rather than representing the actual hardware trigger delay in physics experiments.

Large-scale trigger and data acquisition systems used in physics are often implemented with FPGA, ASIC or special-purpose fast processor cards. The ESP8266-based structure used in this study is not intended to replace these high-performance infrastructures. However, it is valuable in that it makes it experimentally visible how the same logical principle increases the processing load as the number of inputs increases.

In particle physics, the acceptance of an event often depends on the simultaneous satisfaction of multiple conditions; Event decomposition, time window conditions, and simultaneity analysis in nuclear spectroscopy require similar logical structures; In gravitational wave and photon science systems, real-time digital decision and control systems are important. Therefore, the multiple-input AND gate study can be considered as small-scale experimental modeling of a process that has a direct counterpart in physical experimental infrastructures.

The significant difference between the total time and the NodeMCU time also shows that the concepts of algorithm latency and system latency should be separated in physical measurement chains. In large experiments, not only calculation; The bus, link topology, synchronization, buffering, and software layers are also known to determine the total performance. This study shows that a similar distinction can be clearly observed in small-scale embedded systems.

Conclusion

In this study, an ESP8266-based, web-controlled multi-input AND gate platform with dynamic input numbers was developed and evaluated experimentally. The analysis, based on a total of 1280 measurement records, showed that an increase in the number of inputs strongly and steadily increased the NodeMCU-side measured processing time.

The system goes beyond digital logic experiments thanks to its low-cost and reconfigurable structure; It provides a platform where triggering, concurrency control, data preprocessing and discrete state modeling problems used in physics can be discussed experimentally.

In future studies, we will compare other logical structures such as OR, NAND, NOR and XOR on the same platform; expanding true hardware integration with physical input/output lines; In addition, repeating the same experimental setup on higher speed platforms will further increase the scientific value of this study.

Conflicts of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

References

- Ambrosi, G., Bartocci, S., Basara, L., Battiston, R., Burger, W. J., Campana, D. & Zuccon, P. (2021). The electronics of the High-Energy Particle Detector on board the CSES-01 satellite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1013, 165639.
- ATLAS Collaboration. (2024). *ATLAS trigger procedure and Run-3 context documentation*. CERN.
- Bartos, I., Bork, R., Factourovich, M., Heefner, J., Márka, S., Márka, Z. & Sigg, D. (2010). The Advanced LIGO timing system. *Classical and Quantum Gravity*, 27(8), 084025.
- Bianchini, C., Browne, J., Kim, K. H. & Krejcik, P. (2018). LCLS-II timing pattern generator configuration GUIs. *TUMPL04*. SLAC National Accelerator Laboratory.
- Bui, T. Q. T., Elango, A. & Landry, R. J. (2022). FPGA-based autonomous GPS-disciplined oscillators for wireless sensor network nodes. *Sensors*, 22(9), 3135.
- Champion, C., Punch, M., Oger, R., Colonges, S. & Moudden, Y. (2017). TiCkS: A flexible White-Rabbit based time-stamping board. *arXiv preprint arXiv:1710.07128*.

- Chowdhury, S. R. & CMS Collaboration. (2020). The phase-2 upgrade of the CMS outer tracker. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 979, 164432.
- Duarte, J., Han, S., Harris, P., Jindariani, S., Kreinar, E., Kreis, B. & Wu, Z. (2018). Fast inference of deep neural networks in FPGAs for particle physics. *Journal of Instrumentation*, 13(07), P07027-P07027.
- Galli, L., Baldini, A. M., Cei, F., Chiappini, M., Francesconi, M., Grassi, M. & Signorelli, G. (2019). WaveDAQ: An highly integrated trigger and data acquisition system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 936, 399-400.
- Harmand, M., Coffee, R., Bionta, M. R., Chollet, M., French, D., Zhu, D. & Cammarata, M. (2013). Achieving few-femtosecond time-sorting at hard X-ray free-electron lasers. *Nature Photonics*, 7(3), 215-218.
- Hennig, W. & Hoover, S. (2021). White rabbit time synchronization for radiation detector readout electronics. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 68(8), 2059-2065.
- Hennig, W., Thomas, V., Hoover, S. & Delaune, O. (2018). Network time synchronization of the readout electronics for a new radioactive gas detection system. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 66(7), 1182-1189.
- Hu, W., Shuai, T., Xie, Y., Chen, P., Pei, Y., Zhao, Y. & Wang, R. (2023). Research on an active hydrogen maser digital circuit control system based on FPGA. *Sensors*, 23(22), 9202.
- Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Asilar, E., Bergauer, T. & Carvalho, W. (2017). The CMS trigger system. *Journal of Instrumentation*, 12(01), P01020-P01020.
- Lemke, H. T., et al. (2015). Beam arrival time monitors.
- Liu, K., Guan, X., Ren, X. & Wu, J. (2024). Disciplining a rubidium atomic clock based on adaptive Kalman filter. *Sensors*, 24(14), 4495.
- Livingstone, J., Dauvergne, D., Etxebeste, A., Fontana, M., Gallin-Martel, M. L., Huisman, B. & Testa, E. (2021). Influence of sub-nanosecond time of flight resolution for online range verification in proton therapy using the line-cone reconstruction in Compton imaging. *Physics in Medicine & Biology*, 66(12), 125012.
- Milshtein, E. (2023). The LCLS-II photoinjector laser infrastructure. *arXiv*.
- Mizukami, A. (2020). ATLAS Level-1 Endcap Muon Trigger for Run 3. *EPJ Web of Conferences*, 245, 01002.
- Nash, K. & CMS Collaboration. (2024). The Phase-2 upgrade of the CMS outer tracker. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1058, 168788.
- Nessi, M., Nordberg, M., Jenni, P. & Smith, K. (2003). *ATLAS high-level trigger, data-acquisition and controls: Technical design report*. CERN-LHCC-2003-022, ATLAS-TDR-016.
- Pásztor, G. (2022). *The phase-2 upgrade of the CMS detector*. CMS-CR-2022-173.
- Real, D., Calvo, D., Burriel, I., Manzaneda, M., Moreno, A., & Parra, I. (2026). Design and Analysis of a Redundant, Low-Jitter Clocking System for White Rabbit Synchronization Switches. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202601.1601.v1>.

- Riu, I. & ATLAS Collaboration. (2017). The ATLAS level-1 topological trigger performance in run 2. *Journal of Physics: Conference Series*, 898(3), 032037.
- Roth, C. H., Kinney, L. L. & John, E. B. (2004). *Fundamentals of logic design*.
- Spieler, H. (2003). Analog and digital electronics for detectors. *Proceedings of the 2003 ICFA School on Instrumentation*, 11-18.
- Sullivan, A. G., Asali, Y., Márka, Z., Sigg, D., Countryman, S., Bartos, I. & Márka, S. (2023). Timing system of LIGO discoveries. *Physical Review D*, 108(2), 022003.
- Summers, S., Bestintzanos, I. & Petrucciani, G. (2024). Reconstructing jets in the Phase-2 upgrade of the CMS Level-1 Trigger with a seeded cone algorithm. *EPJ Web of Conferences*, 295, 02024.
- Wirthlin, M. (2015). High-reliability FPGA-based systems: Space, high-energy physics, and beyond. *Proceedings of the IEEE*, 103(3), 379-389.
- Yii, M. W., Zaharudin, A. & Ishak, M. (2009). *Signal processing and electronics for nuclear spectrometry*. IAEA-TECDOC-1634, 81.
- Zeynalova, O. V., Zeynalov, S. S., Hamsch, F. J. & Oberstedt, S. (2009). Application of digital signal processing in nuclear spectroscopy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 73(4),

Seasonal Temperature Change in the Eastern Anatolia Region During 1950-2025 Based on ERA5 Data

Ertuğrul GÜL

Hakkari Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri MYO/Çevre Sağlığı Bölümü, Hakkari, Türkiye
email: ertugrugul@hakkari.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1953495

Geliş tarihi/Received: 17/05/2026

Kabul tarihi/Accepted: 18/07/2026

Abstract

The Eastern Anatolia Region is one of Türkiye's highest and most strongly continental areas and is sensitive to temperature change in terms of water resources, snow regime and agriculture. Most existing studies for the region rely on station data that poorly represent the sparsely instrumented high-altitude terrain or cover periods shorter than 30 years, and they are often limited to regional averages that cannot adequately reveal seasonal and provincial spatial differentiation. To address this gap, this study examines annual and seasonal changes in 2 m air temperature over an ERA5 grid masked to the Eastern Anatolia provincial boundaries during 1950-2025, jointly at the regional, grid-cell and provincial scales. Hourly t2m data were converted to degrees Celsius; monthly, seasonal and annual means were produced; and regional averages were computed using cosine-latitude area weighting. Trend direction and significance were assessed with the Mann-Kendall test and trend magnitude with Sen's slope estimator, while WMO standard normal periods (1961-1990 and 1991-2020) and 2021-2025 recent anomalies were compared. The annual mean Sen slope was 0.28 °C per decade and highly significant ($p<0.001$); seasonal slopes were 0.22, 0.30, 0.35 and 0.20 °C per decade for winter, spring, summer and autumn, respectively, all showing significant warming. The 1991-2020 annual mean was 0.79 °C warmer than the 1961-1990 reference, and the 2021-2025 mean was 1.61 °C above the 1991-2020 normal. ERA5 annual mean temperatures showed high agreement with main station observations across the region (Pearson $r = 0.82-0.93$; $p<0.001$). Through this multi-scale, long-term assessment, the study reveals a persistent, seasonally differentiated and recently intensified warming signal in Eastern Anatolia, and provides raw province- and season-level trend results that offer actionable regional detail for water, agriculture and disaster management.

Keywords: ERA5 reanalysis; Long-term temperature trend; WMO climate normals; Mann-Kendall test; Eastern Anatolia

ERA5 Verileriyle Doğu Anadolu Bölgesi'nde 1950-2025 Döneminde Sıcaklığın Mevsimsel Değişimi

Özet

Doğu Anadolu, Türkiye'nin en yüksek ve en belirgin karasal iklim özelliklerini gösteren bölgelerinden biri olup sıcaklık değişimine karşı su kaynakları, kar rejimi ve tarım açısından duyarlıdır. Bölgeye ilişkin mevcut çalışmaların önemli bölümü, istasyon ağının seyrek olduğu yüksek kesimleri sınırlı temsil eden istasyon verilerine dayanmakta veya 30 yılın altındaki dönemleri kapsamakta; ayrıca çoğunlukla bölge ortalamasıyla sınırlı kalarak mevsim ve il düzeyindeki mekânsal farklılaşmayı yeterince ortaya koyamamaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu gidermek amacıyla Doğu Anadolu il sınırlarıyla maskelenmiş ERA5 grid alanında 1950-2025 dönemi 2 m hava sıcaklığının yıllık ve mevsimsel değişimini bölge ortalaması, grid hücresi ve il ölçeğinde birlikte incelemektedir. Saatlik t2m verileri santigrat dereceye dönüştürülmüş; aylık, mevsimsel ve yıllık ortalamalar üretilmiş; bölgesel ortalamalar kosinüs-enlem alan ağırlıklandırmasıyla hesaplanmıştır. Eğilim yönü ve anlamlılığı Mann-Kendall testiyle, büyüklüğü Sen eğim tahmincisiyle değerlendirilmiştir; ayrıca WMO standart normal dönemleri (1961-1990 ve 1991-2020) ile 2021-2025 güncel anomalileri karşılaştırılmıştır. Yıllık ortalama sıcaklık için Sen eğimi 0,28 °C/10 yıl olarak hesaplanmış ve istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı bulunmuştur ($p<0,001$); mevsimsel eğilimler kış, ilkbahar, yaz ve sonbaharda sırasıyla 0,22, 0,30, 0,35 ve 0,20 °C/10

yıl olup bütün mevsimlerde anlamlı artış göstermiştir. WMO karşılaştırmasında 1991-2020 yıllık ortalaması 1961-1990 referansından 0,79 °C, 2021-2025 ortalaması ise 1991-2020 normalinden 1,61 °C daha sıcaktır. ERA5 yıllık ortalama sıcaklıkları bölgedeki ana istasyon gözlemleriyle yüksek uyum göstermiştir (Pearson $r=0,82-0,93$; $p<0,001$). Çok ölçekli ve uzun dönemli bu değerlendirme, Doğu Anadolu'da sıcaklık artışının uzun dönemli, mevsimsel olarak farklılaşan ve güncel normal dönemlerde belirginleşen tutarlı bir iklim sinyali olduğunu ortaya koymakta; il ve mevsim bazlı ham eğilim sonuçları ise su, tarım ve afet yönetimi için kullanılabilir bölgesel ayrıntı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: ERA5 yeniden analiz; Uzun dönem sıcaklık eğilimi; WMO iklim normalleri; Mann-Kendall testi; Doğu Anadolu

Giriş

Hava sıcaklığı, iklim sistemindeki değişimi izlemek için kullanılan temel değişkenlerden biridir ve yüzey sıcaklığındaki değişimler buharlaşma, kar birikimi, kar erimesi, toprak nemi, tarımsal üretim, enerji talebi ve afet riskleri üzerinde doğrudan etkiler oluşturur. Küresel ortalama yüzey sıcaklığı sanayi öncesi döneme kıyasla yaklaşık 1,1 °C artmış olup ısınma kara alanlarında okyanus yüzeylerine göre daha hızlı gerçekleşmektedir (IPCC, 2021; 2023). Akdeniz havzası ve onu çevreleyen Orta Doğu, sıcaklık artışının küresel ortalamaadan daha yüksek seyrettiği ve kuraklaşma eğiliminin belirginleştiği iklim değişikliği sıcak noktalarından biri olarak tanımlanmaktadır (Giorgi, 2006; Lelieveld vd., 2012; Zittis vd., 2022). Bu nedenle sıcaklık değişiminin yalnızca küresel değil, bölgesel ve mevsimsel ölçekte de izlenmesi iklim değerlendirmeleri için gereklidir.

Türkiye bu havzanın kuzeydoğu kenarında yer almaktadır ve ülke içinde Doğu Anadolu Bölgesi en yüksek ortalama yükseltiye ve en belirgin karasal iklim özelliklerine sahip alanlardan biridir (Keskin & Saplıoğlu, 2023). Bölgede uzun ve sert kış koşulları belirleyicidir; dağlık doğu ve kuzeydoğu kesimlerde yıllık don günü sayısı 180 güne ulaşmakta ve don koşulları büyük ölçüde kışın Orta Asya kaynaklı termik yüksek basınç sistemlerinin etkisiyle şekillenmektedir (Erlat & Türkeş, 2012). Kış ve ilkbahar sıcaklıkları kar örtüsünün birikimi ve erime zamanlaması üzerinde belirleyicidir (Akyurek vd., 2023; Blau vd., 2024), yaz sıcaklıklarındaki artış ise Akdeniz Havzası'nda bileşik sıcak-kurak olayların artışını yönlendiren temel etken olarak belirlenmiştir (Vogel vd., 2021). Bu özellikler, bölgede sıcaklık değişiminin mevsimsel ölçekte ayrı ayrı incelenmesini gerekli kılmaktadır.

Türkiye ve bölge ölçeğinde sıcaklık eğilimleri çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Turkes ve Sumer (2004) 1930-2000 döneminde Türkiye genelinde sıcaklık serilerinde belirgin değişkenlik ve bölgesel farklılaşma saptamış; Hadi ve Tombul (2018) 1960-2010 döneminde mekânsal olarak yaygın pozitif eğilimler bildirmiştir. Daha güncel çalışmalardan Asikoglu vd. (2025) ve Ceyhunlu ve Ceribasi (2024) Türkiye genelinde anlamlı ısınma eğilimleri ortaya koymuş; Doğu ve Güneydoğu Anadolu özelinde Keskin ve Saplıoğlu (2023) ile Güngören vd. (2026) sıcaklık ve ekstrem iklim indekslerinde artış yönünde değişimler raporlamıştır. İl ve havza ölçeğindeki çalışmalar da benzer bir tabloyu desteklemektedir: Doğu Anadolu'da Van ili için Esit vd. (2024) ve Elazığ ili için Acar (2024) sıcaklık serilerinde artış yönünde eğilimler saptamış, komşu Güneydoğu Anadolu'da Gümüş vd. (2023) meteorolojik değişkenlerde benzer örüntüler bildirmiştir. Türkiye'nin diğer bölgelerinde de Ege'de Mersin vd. (2022) ve Batı Karadeniz'de Ay (2020) sıcaklık serilerinde pozitif eğilimler raporlanmıştır. Bu çalışmalar, eğilim değerlendirmesinde Mann-Kendall testi ve Sen eğim tahmincisinin yaygın biçimde kullanıldığını göstermektedir (Kendall, 1975; Mann, 1945; Sen, 1968).

Mevcut çalışmalar değerli bulgular sunmakla birlikte üç önemli sınırlılık taşımaktadır. Birincisi, çalışmaların önemli bir bölümü istasyon noktalarına dayalıdır ve istasyon ağının seyrekleştiği yüksek rakımlı, topoğrafik olarak karmaşık kesimleri sınırlı biçimde temsil etmektedir. İkincisi, bölgesel ölçekli bazı analizler 30 yılın altında ya da keyfi alt dönemler üzerinden yürütülmüş olup bu durum, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün en az 30 yıllık gözlem önerisiyle tam örtüşmediğinden eğilim kestirimlerinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Üçüncüsü, bölge ortalamasına dayalı değerlendirmeler mevsim ve il düzeyindeki mekânsal farklılaşmayı tek başına yansıtamamaktadır. Bu sınırlılıklar, mekânsal olarak tutarlı, uzun dönemli ve grid tabanlı bir veri kaynağına olan ihtiyacı ortaya koymaktadır. ERA5 yeniden analiz verileri, gözlem, model ve veri asimilasyonu bileşenlerini birleştirerek 1940 sonrası için uzun dönemli ve mekânsal olarak tutarlı meteorolojik alanlar üretmekte (Copernicus Climate Change Service, 2018; Hersbach vd., 2020). Türkiye üzerinde sıcaklık verilerinin doğrulanmasına ilişkin bulgular da bu veri setinin bölgesel analizlerde kullanılabilirliğini desteklemektedir (Yılmaz, 2022).

Bu çalışmanın amacı, Doğu Anadolu Bölgesi'nde 1950-2025 döneminde ERA5 saatlik 2 m sıcaklık verilerini kullanarak yıllık ve mevsimsel sıcaklık değişimini bölge ortalaması, grid ölçeği ve il bazında birlikte ortaya koymaktır. Eğilim yönü Mann-Kendall testiyle, büyüklüğü ise Sen eğim tahmincisiyle hesaplanmış; ayrıca WMO standart normal dönemleri (1961-1990 ve 1991-2020) ile 2021-2025 güncel anomalileri karşılaştırılmıştır. Bu çerçevede üç araştırma sorusu ele alınmaktadır: (i) 1950-2025 döneminde yıllık ve mevsimsel ortalama sıcaklıkta istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim var mıdır; (ii) eğilimin büyüklüğü ve anlamlılığı mevsimler ile iller arasında nasıl farklılaşmaktadır; (iii) WMO normal dönemleri ve güncel anomaliler uzun dönemli eğilimle tutarlı bir ısınma sinyali ortaya koymakta mıdır?

Bu çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde özetlenebilir:

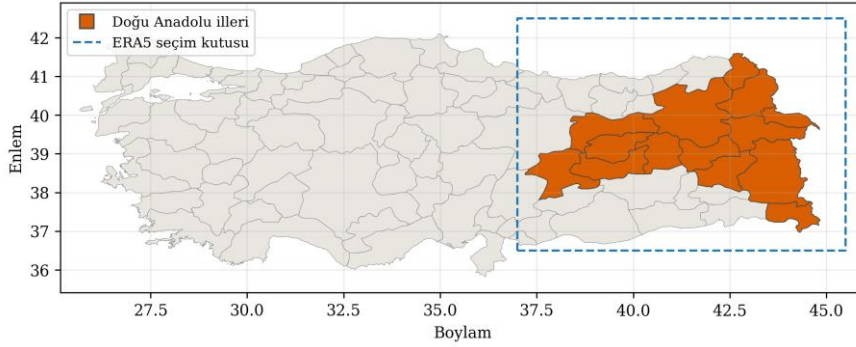
- Doğu Anadolu için, Dünya Meteoroloji Örgütü'nün 30 yıllık koşulunu fazlasıyla karşılayan 76 yıllık (1950-2025) uzun dönemli ve grid tabanlı bir ERA5 sıcaklık eğilimi analizi sunulmaktadır.
- Eğilimler tek bir ölçekle sınırlı kalmadan bölge ortalaması, grid hücresi ve il düzeyinde birlikte değerlendirilmekte; il ve mevsim bazlı hem Mann-Kendall ve Sen eğimi sonuçları açık biçimde raporlanmaktadır.
- WMO standart normal dönemleri ve 2021-2025 güncel anomalileri, uzun dönemli eğilim bulgularını tamamlayacak biçimde karşılaştırılmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak, il merkezi Doğu Anadolu Bölgesi sınırları içinde yer alan 14 ilin (Ağrı, Ardahan, Bingöl, Bitlis, Elazığ, Erzincan, Erzurum, Hakkari, Iğdır, Kars, Malatya, Muş, Tunceli ve Van) idari sınırları kabul edilmiştir. İl sınırları coğrafi bölge sınırlarıyla birebir örtüşmediğinden bu tanım, il merkezi bölge dışında kalan ancak bazı ilçeleri Doğu Anadolu'da yer alan illeri (ör. Sivas, Kahramanmaraş) kapsam dışında bırakmaktadır. ERA5 verileri önce 37,0-45,0°D boylamları ile 36,5-42,5°K enlemleri arasındaki seçim kutusuna kesilmiş, ardından Doğu Anadolu il sınırlarını içeren vektör sınır dosyasıyla maskelenmiştir. Böylece analizler yalnızca bölgeyi temsil eden ERA5

grid hücreleri üzerinden hesaplanmıştır. Çalışma alanının Türkiye içindeki konumu ve analizde kullanılan ERA5 t2m grid kapsamı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Türkiye sınırları içerisinde çalışma alanının konumu.

Veri Seti ve Ön İşleme

Araştırmada, ERA5 saatlik tek seviye yeniden analiz veri setinden 2 m hava sıcaklığı değişkeni kullanılmıştır. ERA5 veri seti 1940'tan günümüze uzanmakla birlikte, bu çalışmada analizler 1 Ocak 1950 ile 31 Aralık 2025 tarihleri arasındaki dönem için yürütülmüştür (Copernicus Climate Change Service, 2018; Hersbach vd., 2020). ERA5 veri setinde Kelvin biriminde sunulan t2m değerleri, analiz öncesinde Santigrat dereceye ($^{\circ}\text{C}$) dönüştürülmüştür. Kullanılan veri setinin kapsamı, analiz dönemi, mekânsal maskeleme yaklaşımı ve eğilim analizinde uygulanan yöntem Tablo 1'de özetlenmiştir.

Saatlik sıcaklık verileri öncelikle aylık ortalamalara, ardından mevsimsel ve yıllık ortalamalara dönüştürülmüştür. Mevsimsel sınıflandırmada kış dönemi aralık, ocak ve şubat; ilkbahar dönemi mart, nisan ve mayıs; yaz dönemi haziran, temmuz ve ağustos; sonbahar dönemi ise eylül, ekim ve kasım ayları esas alınarak tanımlanmıştır. Aralık ayı, meteorolojik kış tanımına uygun olarak izleyen yılın kış mevsimine atanmıştır. Bu nedenle 1950-2025 analizinde kış serisi 75 tam mevsimden, ilkbahar, yaz, sonbahar ve yıllık seriler ise 76 gözlemden oluşmaktadır.

Tablo 1. Veri seti ve analiz kapsamı.

Bileşen	Açıklama
Veri kaynağı	ERA5 t2m saatlik yeniden analiz verisi
Analiz dönemi	1950-2025
Zaman adedi	666.216 saat
Koordinat aralığı	36,5-42,5°K; 37,0-45,0°D
Mekânsal maske	Doğu Anadolu il sınırları
Grid sayısı	245 maskeli grid hücresi
Birim dönüşümü	K - 273,15 = $^{\circ}\text{C}$
Eğilim yöntemi	Mann-Kendall testi ve Sen eğimi

Bölgesel ortalamaların hesaplanmasında, grid hücrelerinin enleme bağlı alan farklılıkları kosinüs-enlem ağırlıklandırması kullanılarak dikkate alınmıştır. Bu işlem sıcaklık değerlerine ampirik bir düzeltme uygulamak değil, alan ortalamasının grid

hücresi yüzey alanını temsil edecek biçimde hesaplanmasıdır. Ayrıca Dünya Meteoroloji Örgütü'nün klimatolojik standart normal yaklaşımına uygun olarak 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 ve 1991-2020 dönemleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir (WMO, 2017).

İstatistiksel Analiz

Mevsimsel sıcaklık serilerindeki eğilim yönü ve istatistiksel anlamlılık Mann-Kendall testi ile belirlenmiştir (Kendall, 1975; Mann, 1945). Eğilim büyüklüğü Sen eğim tahmincisi ile °C/yıl olarak hesaplanmış ve yorum kolaylığı için °C/10 yıl biçiminde raporlanmıştır (Sen, 1968). Türkiye'de sıcaklık ve yağış eğilimlerinin incelendiği çalışmalarda da bu parametrik olmayan yaklaşım yaygın biçimde kullanılmaktadır (Keskin & Saplıoğlu, 2023; Topuz, 2026).

Mann-Kendall testi parametrik olmayan bir eğilim testidir; verilerin belirli bir olasılık dağılımına (ör. normal dağılım) uymasını gerektirmez, sıralama temelli yapısı sayesinde uç değerlere ve eksik gözlemlere karşı dayanıklıdır ve iklim serilerindeki monotonik eğilimlerin saptanmasında yaygın olarak tercih edilir. Sen eğim tahmincisi de parametrik olmayan bir yöntem olup eğilim büyüklüğünü gözlem çiftleri arasındaki eğimlerin medyanı olarak hesapladığından, en küçük kareler regresyonuna kıyasla uç değerlerden daha az etkilenir. Bu özellikler, yıllar arası değişkenliğin yüksek ve dağılımın her zaman simetrik olmadığı mevsimsel sıcaklık serileri için iki yöntemi de uygun kılmaktadır. Mevsimsel serilerde olası otokorelasyonun anlamlılık değerlendirmesini etkileyebileceği göz önünde bulundurularak bulgular yalnızca anlamlılık eşiğine değil, eğilimlerin bölge ortalaması ve grid ölçeğindeki mekansal tutarlılığına da dayandırılmıştır.

İstatistiksel anlamlılık $p < 0,05$ düzeyi temel alınarak değerlendirilmiştir. Bölge ortalamasına ek olarak her grid hücresinde mevsimsel Sen eğimi ve Mann-Kendall p değeri hesaplanmış, böylece eğilimlerin mekansal dağılımı haritalanmıştır. Böylece eğilimler iki ölçekte elde edilmiştir: (i) bölge ortalaması serisinden hesaplanan tek bir bölgesel eğim ve (ii) her ERA5 grid hücresinin kendi zaman serisinden ayrı ayrı hesaplanan hücre bazlı eğimler. WMO normal dönemi karşılaştırmalarında 1961-1990 uzun dönem referansı, 1991-2020 ise güncel normal koşulları temsil eden dönem olarak kullanılmıştır; 2021-2025 yılları 1991-2020 normaline göre güncel anomali olarak değerlendirilmiştir.

Doğrulama Verisi ve Yöntemi

ERA5 sonuçlarının yer gözlemleriyle tutarlılığını değerlendirmek üzere, Küresel Tarihsel Klimatoloji Ağı-Günlük (GHCN-Daily) veri tabanından elde edilen istasyon kayıtları kullanılmıştır (Menne vd., 2012). Doğu Anadolu illerinde GHCN-Daily kaydı bulunan sekiz istasyon (Erzincan, Erzurum, Van, Elazığ, Bingöl, Kars, Ağrı ve Muş) analize dahil edilmiştir; bunlardan dördü 1950'li yıllardan başlayan uzun kayıtlara, Ağrı ve Muş ise yaklaşık 12-13 yıllık kısa kayıtlara sahiptir. Günlük ortalama sıcaklıklardan tüm ayların tamamlandığı yıllar için yıllık ortalamalar üretilmiş; her istasyon koordinatına en yakın ERA5 grid hücresiyle eşleştirilerek ortak yıllar üzerinde Pearson korelasyon katsayısı, eğilimden arındırılmış korelasyon ve ortalama fark (yanlılık) hesaplanmıştır.

BULGULAR

Mevsimsel ve Yıllık Eğilimler

ERA5 t2m verilerine göre çalışma alanında 1950-2025 döneminin yıllık ortalama sıcaklığı 7,20 °C olarak hesaplanmıştır. Yıllık seri için Sen eğimi 0,28 °C/10 yıl olup Mann-Kendall testi bu eğilimin istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı olduğunu göstermiştir ($p<0,001$). Bölge ortalamasına ait yıllık ve mevsimsel eğilim değerleri Tablo 2'de, mevsimsel zaman serileri ise Şekil 2'de verilmiştir.

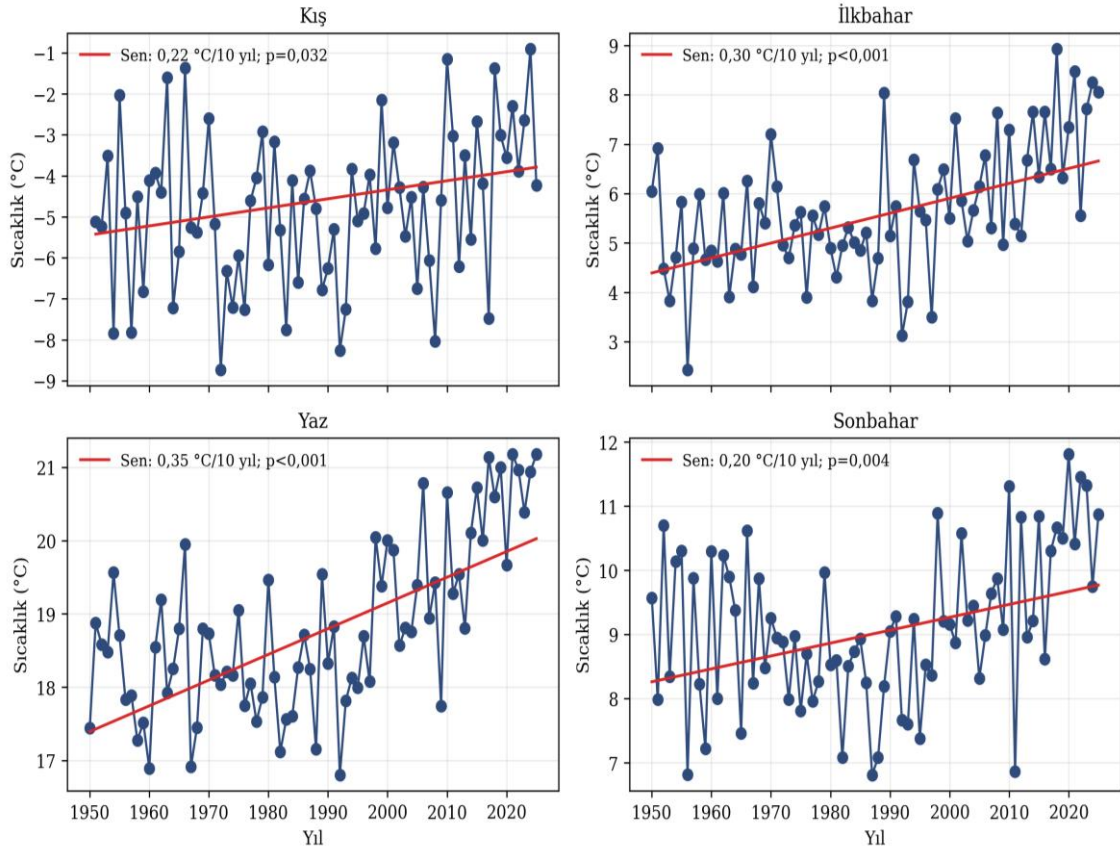
Mevsimsel ölçekte bütün mevsimlerde anlamlı artış belirlenmiştir; ancak eğilim büyüklüğü ve istatistiksel güç mevsimler arasında farklılaşmaktadır. 1950-2025 döneminde mevsimsel ortalamalar kış için -4,80 °C, ilkbahar için 5,67 °C, yaz için 18,83 °C ve sonbahar için 9,12 °C olarak hesaplanmıştır. Yaz ve kış ortalamaları arasındaki yaklaşık 23,6 °C'lik fark, bölgenin karasal iklim rejimiyle tutarlı yüksek bir mevsimsel termal genliğe işaret etmektedir. Yıllık genlik serisinde (yaz-kış; 1951-2025) istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenmemiştir (Sen eğimi 0,14 °C/10 yıl; $p=0,18$); bir başka deyişle ısınma her mevsimde görülürken mevsimsel genlik dönem boyunca korunmuştur.

Sen eğimi en yüksek yaz mevsiminde 0,35 °C/10 yıl olarak belirlenmiştir ($p<0,001$). İlkbahar eğimi 0,30 °C/10 yıl ($p<0,001$), kış eğimi 0,22 °C/10 yıl ($p=0,032$) ve sonbahar eğimi 0,20 °C/10 yıl ($p=0,004$) olarak hesaplanmıştır. Bu sıralama, bölgedeki uzun dönemli ısınma sinyalinin yalnızca kış mevsimiyle sınırlı olmadığını, özellikle yaz ve ilkbahar mevsimlerinde daha güçlü olduğunu göstermektedir.

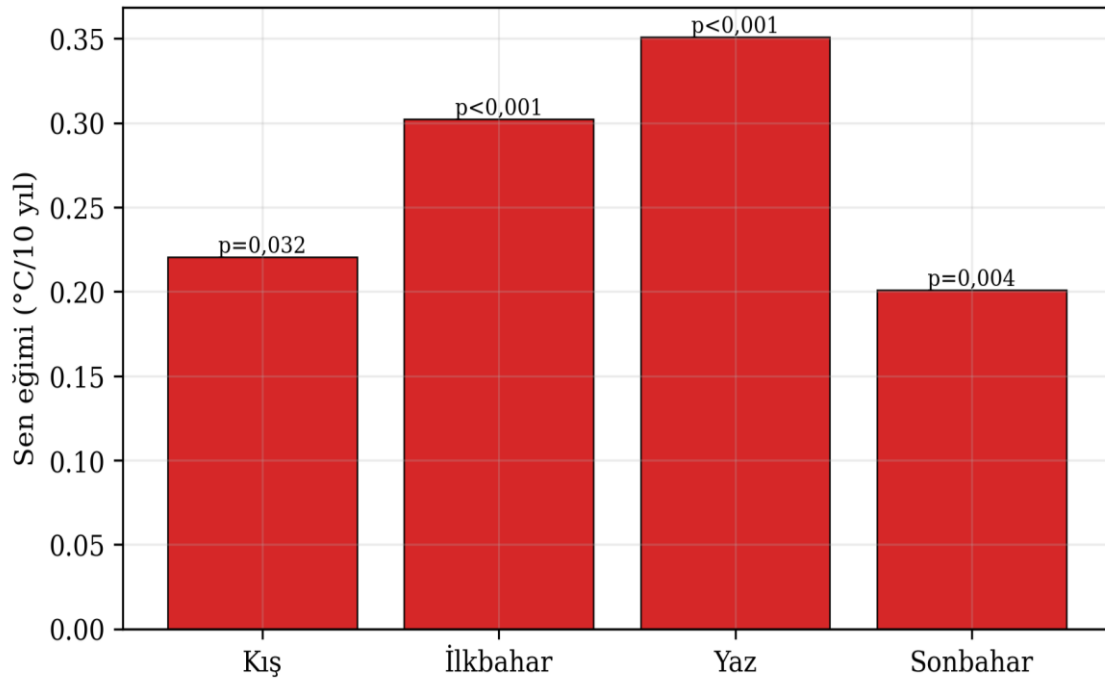
Bütün mevsimlerde anlamlı pozitif eğilim bulunması, Doğu Anadolu'daki sıcaklık artışının yalnızca tek bir mevsime bağlı olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte eğilim büyüklüklerinin mevsimler arasında farklılaşması, bölgesel iklim etkilerinin su kaynakları, kar rejimi, tarımsal üretim ve enerji talebi açısından mevsim bazında değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Şekil 3, mevsimsel Sen eğimlerini p değerleriyle birlikte görselleştirerek bu çok mevsimli ısınma örüntüsünü özetlemektedir.

Tablo 2. Bölge ortalamasına göre sıcaklık eğilimleri.

Dönem	n	Ortalama (°C)	Sen (°C/10 yıl)	p	Sınıf
Kış	75	-4,80	0,22	0,032	anlamlı artış
İlkbahar	76	5,67	0,30	<0,001	anlamlı artış
Yaz	76	18,83	0,35	<0,001	anlamlı artış
Sonbahar	76	9,12	0,20	0,004	anlamlı artış
Yıllık	76	7,20	0,28	<0,001	anlamlı artış



Şekil 2. Doğu Anadolu Bölgesi 1950-2025 mevsimsel sıcaklık serileri ve Sen eğilim çizgileri.



Şekil 3. Mevsimlere göre Sen eğilimi ve Mann-Kendall p değerleri (1950-2025).

Mekansal Eğilimler

Mevsimsel ortalama sıcaklık dağılımı, çalışma alanında güçlü bir topoğrafik ve enlemsel farklılaşma olduğunu göstermektedir. Şekil 4'e göre kış mevsiminde yüksek plato ve dağlık alanlarda düşük sıcaklıklar belirginleşirken, yaz mevsiminde güney ve güneybatı kesimlerde daha yüksek sıcaklık değerleri öne çıkmaktadır. Kış mevsiminde en düşük il ortalamaları kuzeydoğudaki yüksek platoda Ardahan ($-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), Kars ($-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve Erzurum ($-6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) için hesaplanmıştır; yaz mevsiminde en yüksek ortalamalar güneybatıdaki görece alçak havzalarda Elazığ ($24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve Malatya ($22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) için belirlenmiştir. Kuzey enlemde yer almasına karşın alçak Iğdır ovasında kış ortalamasının ($-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) plato illerine göre belirgin biçimde ılıman olması, yükseltinin yer yer enlem etkisini baskıladığını göstermektedir. Bu desen, bölgesel ortalamaların tek başına yeterli olmadığını ve sıcaklık değişiminin grid ölçeğinde de değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

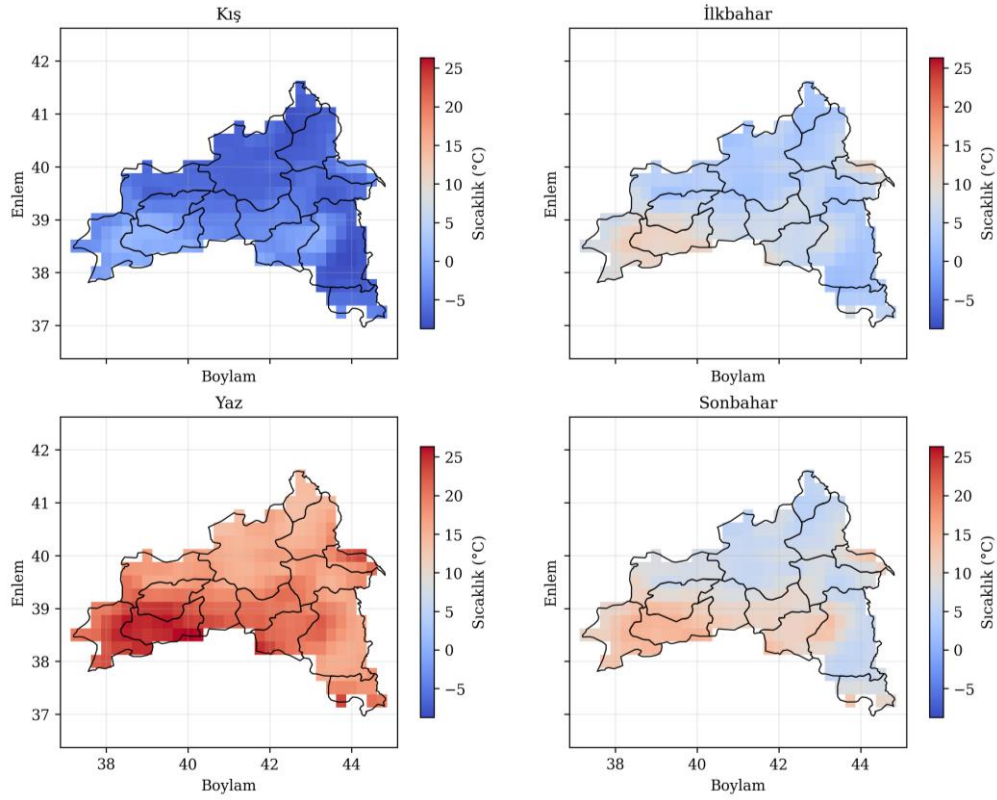
Grid bazlı Sen eğimi sonuçları, tüm mevsimlerde pozitif eğilimlerin baskın olduğunu göstermektedir. Tablo 3'te özetlenen bulgulara göre grid hücresi bazında hesaplanan ortalama Sen eğimleri kış, ilkbahar, yaz ve sonbaharda sırasıyla 0,22, 0,31, 0,35 ve 0,20 $^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ düzeyindedir. Bölge ortalamasında olduğu gibi grid ölçeğinde de en yüksek ortalama eğim yaz mevsiminde hesaplanmıştır.

Grid hücresi bazında hesaplanan mevsimsel Sen eğimlerinin mekânsal dağılımı incelendiğinde yaz mevsiminde eğimlerin 0,24 ile 0,43 $^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$, ilkbaharda 0,20 ile 0,46 $^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$, kışta 0,05 ile 0,58 $^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ ve sonbaharda 0,11 ile 0,30 $^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ arasında değiştiği görülmektedir. $p<0,05$ düzeyindeki anlamlı grid oranı yaz ve ilkbaharda %100'e ulaşırken sonbaharda %93,5, kışta ise %40,4 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, uzun dönemli sıcaklık artışının özellikle ilkbahar ve yaz aylarında mekansal olarak daha tutarlı olduğunu; kış eğilimlerinin ise yıllar arası değişkenlik ve topoğrafik karmaşıklık nedeniyle daha heterojen bir yapı sergilediğini göstermektedir.

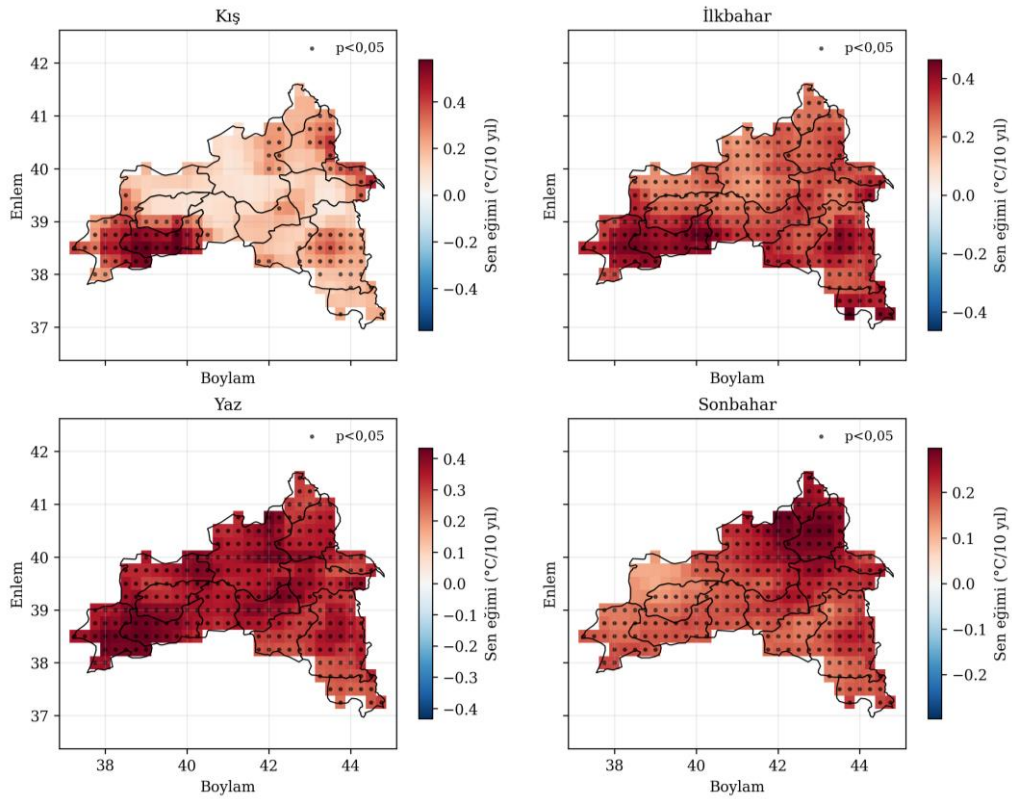
Şekil 5'teki eğilim haritaları, anlamlı ısınmanın yalnızca sınırlı bir alt bölgede değil, çalışma alanının geniş bölümünde gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık kış mevsiminde anlamlı grid oranının daha düşük olması, kış sıcaklıklarının bölge içinde daha değişken davrandığını ve yerel istasyonlarla çapraz doğrulamanın özellikle bu mevsim için önemli olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 3. Grid bazlı mevsimsel eğilimlerin mekansal özeti.

Mevsim	Ortalama Sen	Min.	Maks.	$p<0,05$ grid (%)
Kış	0,22	0,05	0,58	40,4
İlkbahar	0,31	0,20	0,46	100,0
Yaz	0,35	0,24	0,43	100,0
Sonbahar	0,20	0,11	0,30	93,5



Şekil 4. 1950-2025 döneminde mevsimsel ortalama sıcaklık dağılımı.



Şekil 5. Grid bazlı mevsimsel Sen eğimi haritaları; siyah noktalar $p < 0,05$ düzeyindeki grid hücrelerini göstermektedir.

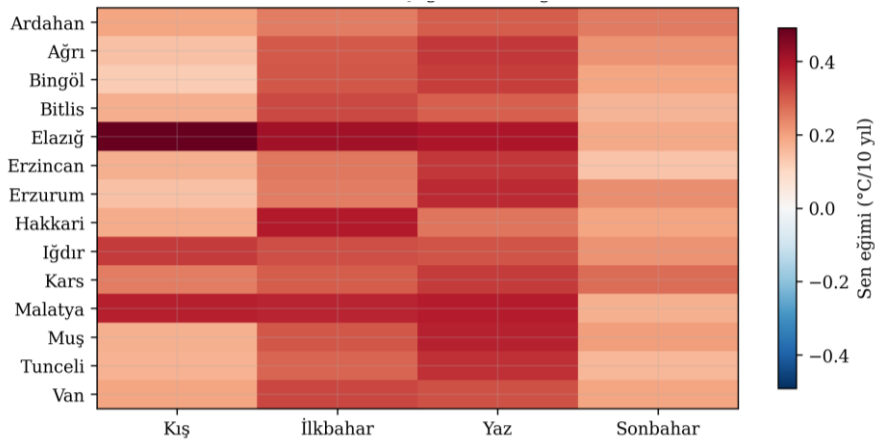
Mevsimsel Sıcaklık Eğilimlerinin Mekansal Farklılaşması

Bölge geneline ilişkin eğilim değerlerinin il ölçeğinde nasıl farklılaştığını belirlemek amacıyla, Doğu Anadolu sınırları içinde kalan ERA5 grid hücrelerinden her il için mevsimsel Sen eğimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, bölge ortalamasının tek başına yansıtamadığı mekansal değişkenliğin ortaya konmasına olanak sağlamaktadır (Keskin & Saplıoğlu, 2023). On dört ile ait mevsimsel Sen eğimi değerleri Tablo 4'te, buna karşılık gelen ısı haritası ise Şekil 6'da sunulmuştur.

Kış mevsiminde il düzeyindeki Sen eğimleri 0,12 ile 0,49 °C/10 yıl arasında dağılmıştır. En yüksek kış eğimi Elazığ'da 0,49 °C/10 yıl olarak belirlenmiş ($p<0,05$); bunu Malatya (0,38, $p<0,05$), Iğdır (0,34, $p<0,05$) ve Kars (0,25, $p<0,05$) izlemiştir. Buna karşılık Ağrı, Bingöl, Erzurum, Hakkari, Muş ve Tunceli gibi bazı illerde kış eğilimleri pozitif olmakla birlikte istatistiksel anlamlılık eşiğine ulaşmamıştır. Bu bulgu, kış mevsiminde bölge içi değişkenliğin devam ettiğini göstermektedir.

İlkbahar mevsiminde il bazlı eğilimlerin büyük bölümü anlamlıdır. En yüksek ilkbahar eğimleri Elazığ (0,41 °C/10 yıl), Hakkari (0,39 °C/10 yıl), Malatya (0,38 °C/10 yıl), Van (0,33 °C/10 yıl) ve Bitlis (0,32 °C/10 yıl) illerinde hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, uzun dönemli ilkbahar ısınmasının yalnızca kuzeydeki yüksek rakımlı illerle sınırlı olmadığını, bölgenin farklı alt kesimlerinde de belirginleştiğini göstermektedir. Yaz mevsiminde bütün illerde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı eğilimler belirlenmiştir. Elazığ (0,40 °C/10 yıl), Malatya (0,39 °C/10 yıl), Muş (0,38 °C/10 yıl), Erzurum (0,37 °C/10 yıl) ve Tunceli (0,36 °C/10 yıl) yaz eğilimleri bakımından öne çıkmaktadır. Sonbaharda da eğilimler genel olarak pozitifdir; Kars (0,27 °C/10 yıl), Ardahan (0,26 °C/10 yıl), Erzurum ve Iğdır (0,22 °C/10 yıl) görece yüksek değerlere sahiptir.

Mevsimler arası tutarlılık açısından Elazığ ve Malatya hem kış hem yaz dönemlerinde yüksek ve anlamlı eğilimler göstermektedir. Hakkari'de ilkbahar eğiminin yüksek, yaz eğiminin ise daha sınırlı olması; Erzurum ve Kars'ta yaz-sonbahar eğilimlerinin belirginleşmesi, bölge içinde tek tip bir ısınma deseninden çok mevsime bağlı farklılaşan bir yapı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle il bazlı bulgular, yalnızca topoğrafik konuma dayalı açıklamalarla değil, mevsimsel atmosferik dolaşım ve yerel arazi koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, il ölçeğinde artış sinyali özellikle ilkbahar ve yaz mevsimlerinde yaygınlaşmaktadır. İl düzeyinde anlamlılık eşiğine ulaşmayan eğilimler, bölge içi yıllar arası değişkenlik ve yerel arazi koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.



Şekil 6. Doğu Anadolu illerinde mevsimsel Sen eğimi değerleri (1950-2025; * $p<0,05$).

Tablo 4. İl ve mevsim bazında ham Mann-Kendall ve Sen eğimi sonuçları (1950-2025). n: gözlem sayısı; τ : Mann-Kendall tau; p: Mann-Kendall anlamlılık değeri.

İl	Mevsim	n	Sen (°C/10 yıl)	p	τ
Ardahan	Kış	75	0,20	0,066	0,15
	İlkbahar	76	0,25	<0,001	0,28
	Yaz	76	0,30	<0,001	0,42
	Sonbahar	76	0,26	<0,001	0,27
Ağrı	Kış	75	0,14	0,188	0,10
	İlkbahar	76	0,30	<0,001	0,36
	Yaz	76	0,35	<0,001	0,43
	Sonbahar	76	0,22	<0,001	0,27
Bingöl	Kış	75	0,12	0,200	0,10
	İlkbahar	76	0,30	<0,001	0,36
	Yaz	76	0,34	<0,001	0,41
	Sonbahar	76	0,19	0,013	0,20
Bitlis	Kış	75	0,18	0,047	0,16
	İlkbahar	76	0,32	<0,001	0,36
	Yaz	76	0,30	<0,001	0,36
	Sonbahar	76	0,17	0,008	0,21
Elazığ	Kış	75	0,49	<0,001	0,32
	İlkbahar	76	0,41	<0,001	0,43
	Yaz	76	0,40	<0,001	0,49
	Sonbahar	76	0,18	0,009	0,20
Erzincan	Kış	75	0,18	0,154	0,11
	İlkbahar	76	0,26	<0,001	0,31
	Yaz	76	0,35	<0,001	0,43
	Sonbahar	76	0,14	0,072	0,14
Erzurum	Kış	75	0,14	0,162	0,11
	İlkbahar	76	0,25	<0,001	0,28
	Yaz	76	0,37	<0,001	0,42
	Sonbahar	76	0,23	0,003	0,23
Hakkari	Kış	75	0,18	0,057	0,15
	İlkbahar	76	0,39	<0,001	0,44
	Yaz	76	0,26	<0,001	0,36
	Sonbahar	76	0,19	0,003	0,23
Iğdır	Kış	75	0,34	0,019	0,19
	İlkbahar	76	0,31	<0,001	0,36
	Yaz	76	0,31	<0,001	0,40
	Sonbahar	76	0,22	<0,001	0,28
Kars	Kış	75	0,25	0,031	0,17
	İlkbahar	76	0,30	<0,001	0,32
	Yaz	76	0,35	<0,001	0,44
	Sonbahar	76	0,27	<0,001	0,28
Malatya	Kış	75	0,38	0,001	0,25
	İlkbahar	76	0,38	<0,001	0,39
	Yaz	76	0,39	<0,001	0,51
	Sonbahar	76	0,18	0,014	0,19
Muş	Kış	75	0,18	0,103	0,13
	İlkbahar	76	0,31	<0,001	0,35
	Yaz	76	0,38	<0,001	0,39
	Sonbahar	76	0,21	0,005	0,22
Tunceli	Kış	75	0,17	0,073	0,14
	İlkbahar	76	0,29	<0,001	0,34
	Yaz	76	0,36	<0,001	0,45
	Sonbahar	76	0,16	0,026	0,17
Van	Kış	75	0,19	0,024	0,18
	İlkbahar	76	0,33	<0,001	0,37
	Yaz	76	0,31	<0,001	0,39
	Sonbahar	76	0,19	0,002	0,24

WMO Normal Dönemleri ve Güncel Anomaliler

Uzun dönemli eğilim analizini tamamlamak için WMO standart normal dönemleri karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, iklim literatüründe kabul gören 30 yıllık standart dönemlerle güncel sıcaklık rejiminin değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada 1961-1990 dönemi uzun dönem referansı, 1991-2020 dönemi ise güncel normal koşulları temsil eden dönem olarak kullanılmıştır.

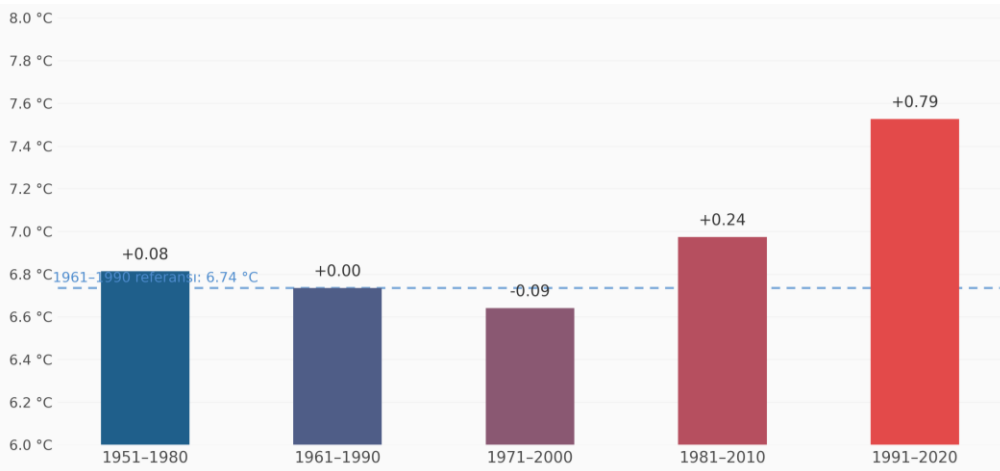
WMO standart normal dönemleri karşılaştırıldığında 1991-2020 yıllık ortalaması 7,53 °C, 1961-1990 ortalaması ise 6,74 °C'dir. Buna göre güncel normal dönem, referans döneme kıyasla 0,79 °C daha sıcaktır. Ayrıca 1981-2010 ve 1991-2020 dönemlerinde yıllık eğilimler istatistiksel olarak anlamlı artış göstermiştir; bu durum ısınma sinyalinin özellikle son normal dönemlerde güçlendiğine işaret etmektedir.

2021-2025 yıllarının yıllık ortalaması 9,13 °C olup 1991-2020 normalinin ortalama 1,61 °C üzerindedir. Mevsimsel anomaliler de pozitif: kışta 1,88 °C, ilkbaharda 1,54 °C, yazda 1,61 °C ve sonbaharda 1,39 °C. Bu sonuç, son yılların yalnızca uzun dönem referansına değil, güncel WMO normaline göre de belirgin biçimde sıcak seyrettiğini göstermektedir.

Tablo 5. WMO standart normal dönemlerine göre yıllık sıcaklık karşılaştırması.

Dönem	n	Yıllık ort. (°C)	Sen (°C/10 yıl)	p	1961-1990 farkı (°C)	Sınıf
1951–1980	30	6,81	-0,08	0,643	0,08	azalış eğilimi
1961–1990	30	6,74	-0,14	0,301	0,00	azalış eğilimi
1971–2000	30	6,64	0,30	0,069	-0,09	artış eğilimi
1981–2010	30	6,97	0,53	<0,001	0,24	anlamlı artış
1991–2020	30	7,53	0,72	<0,001	0,79	anlamlı artış

Not: Fark sütunu 1961-1990 WMO referans dönemine göre hesaplanmıştır.



Şekil 7. WMO yıllık normal dönemleri ve 1961-1990 referansına göre farklar.

TARTIŞMA

Bu çalışmada 1950-2025 dönemi için hesaplanan yıllık $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ eğim, Türkiye genelinde uzun dönemli istasyon serileriyle bildirilen değerlerle uyumludur. Asikoglu vd. (2025), 1960-2022 dönemi için Türkiye genelinde yaklaşık $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ düzeyinde anlamlı bir artış bildirmiştir. Turkes ve Sumer (2004), Hadi ve Tombul (2018), Keskin ve Saplıoğlu (2023), Ceyhunlu ve Ceribasi (2024) ile Topuz (2026) tarafından farklı dönem ve yöntemlerle raporlanan pozitif sıcaklık eğilimleri de bu çalışmanın uzun dönemli artış sonucuyla aynı genel iklim sinyaline işaret etmektedir. Kısa dönemli analizde görülen yüksek eğimlerin uzun dönem bağlamına yerleştirildiğinde daha dengeli bir büyüklüğe indiği görülmektedir.

Tablo 6'da görüldüğü üzere bu çalışmada hesaplanan $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$ düzeyindeki yıllık eğim, Türkiye geneli için bildirilen güncel uzun dönem değerlerle (yaklaşık $0,27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$) büyük ölçüde uyumludur ve 20. yüzyıl baz dönemine ait daha düşük eğimlerin (Turkes & Sumer, 2004) üzerinde yer almaktadır. Bu durum, son onlarca yılda ısınma hızının arttığı yönündeki bulguyla tutarlıdır. Doğu Akdeniz ve Orta Doğu için model temelli çalışmalarda bildirilen daha yüksek eğim aralıkları ise bölgenin bir iklim değişikliği sıcak noktası olarak konumunu yansıtmaktadır (IPCC, 2021).

Tablo 6. Bu çalışmada elde edilen yıllık sıcaklık eğiliminin önceki çalışmalarla karşılaştırması.

Çalışma	Bölge	Dönem	Yıllık ($^{\circ}\text{C}/10\text{ yıl}$)	Yöntem	Not
Bu çalışma	Doğu Anadolu (ERA5)	1950-2025	0,28	MK/Sen	Kış 0,22; İlkbahar 0,30; Yaz 0,35; Sonbahar 0,20
Asikoglu vd. (2025)	Türkiye (istasyon)	1960-2022	$\approx 0,27$	MK/Sen	Uzun dönem; Türkiye geneli
Keskin ve Saplıoğlu (2023)	Doğu Anadolu (istasyon)	1970-2020	$\approx 0,25\text{--}0,40$	MK/İTA	İl bazlı değişkenlik yüksek
Hadi ve Tombul (2018)	Türkiye	1960-2010	$\approx 0,28$	MK/Sen	Mekânsal trend analizi
Ceyhunlu ve Ceribasi (2024)	Türkiye	-	pozitif (anlamlı)	İTA pivot	Sıcaklık ve yağışta değişim
Turkes ve Sumer (2004)	Türkiye	1930-2000	$\approx 0,14$	Regresyon	20. yüzyıl baz eğimi
IPCC AR6 (2021)	Doğu Akdeniz/Orta Doğu	1980-2020	$\approx 0,40\text{--}0,60$	CMIP6	Küresel ortalamadan hızlı ısınma bağlamı
Pepin vd. (2015)	Küresel dağlık alanlar	1960-2010	küresel ort. üzeri	Gözlem/model	Yükseklik-bağımlı ısınma çerçevesi

Mevsimsel açıdan en yüksek uzun dönem eğimin yaz mevsiminde belirlenmesi, bölgedeki sıcaklık artışının yalnızca kış koşullarıyla sınırlı olmadığını göstermektedir.

İlkbahar ve yaz mevsimlerinde anlamlı grid oranının çok yüksek çıkması, tarımsal üretim, evapotranspirasyon ve su talebi açısından sıcaklık artışının geniş alanlı etkiler doğurabileceğini düşündürmektedir. Dağlık alanlarda yükseklik-bağımlı ısınma ve kar-albedo geri beslemesi önemli bir çerçeve sunmakla birlikte, bu çalışmada bağımsız istasyon veya yükseklik modeliyle nedensel doğrulama yapılmadığından bu yorum sınırlılık düzeyinde tutulmuştur (IPCC, 2021; Pepin vd., 2015).

Mevsimler ve iller arasındaki eğilim farklılıklarının birden çok nedeni olabilir. Yaz ve ilkbahar eğilimlerinin daha yüksek ve mekânsal olarak daha tutarlı çıkması, bu mevsimlerde ısınmanın büyük ölçekli atmosferik dolaşım ve artan kısa dalga ışıınımıyla daha düzenli biçimde ilişkilenmesiyle açıklanabilir. Buna karşılık kış eğilimlerinin daha zayıf ve heterojen olması, kış sıcaklıklarının kar örtüsü, sıcaklık terselmesi ve atmosferik bloklama gibi yerel ve yıllar arası değişkenliği yüksek süreçlerden güçlü biçimde etkilenmesiyle tutarlıdır. İl ölçeğindeki farklılıklarda ise yükseklik, karasallık derecesi ve bakı gibi yerel etmenler rol oynamaktadır; yüksek rakımlı dağlık alanlarda kar-albedo geri beslemesi ve yükseklik-bağımlı ısınma eğilimi güçlendirebilirken (Pepin vd., 2015), görece alçak ve güneydeki kesimlerde eğilimler farklı büyüklükte gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle bölge içindeki eğilim örüntüsü tek bir etmenle değil, atmosferik dolaşım ile yerel arazi koşullarının birlikte etkisiyle değerlendirilmelidir.

Bu mevsimsel farklılaşma, bölgeyi etkileyen hava kütleleri ve büyük ölçekli dolaşım desenleriyle de ilişkilendirilebilir. Türkiye'de kış ortalama sıcaklıklarının Arktik Salınım ve Kuzey Atlantik Salınımı fazlarıyla güçlü biçimde modüle edildiği, pozitif fazlarda kuzeyli-kuzeydoğulu akışlarla soğuk karasal polar hava sokulmalarının ülke genelinde tutarlı soğuk sinyaller ürettiği gösterilmiştir (Turkes & Erlat, 2008; Türkeş & Erlat, 2009). Doğu Akdeniz'i etkileyen Kuzey Denizi-Hazar deseni ise özellikle karasal Anadolu platosunda ortalama sıcaklıklar üzerinde yaklaşık 3,5 °C'ye ulaşan mevsimsel farklar yaratmaktadır (Kutiel vd., 2002). Kışın Orta Asya kaynaklı termik yüksek basınç sistemlerinin bölgedeki don koşullarını denetlemesi (Erlat & Türkeş, 2012) ve rekor sıcaklık olaylarının anomalik dolaşım desenleri ve hava kütlesi taşınımıyla ilişkisi (Türkeş & Erlat, 2018) birlikte değerlendirildiğinde, kış eğilimlerinin görece zayıf ve mekânsal olarak heterojen bulunması bu dolaşım kaynaklı yüksek yıllar arası değişkenlikle tutarlıdır.

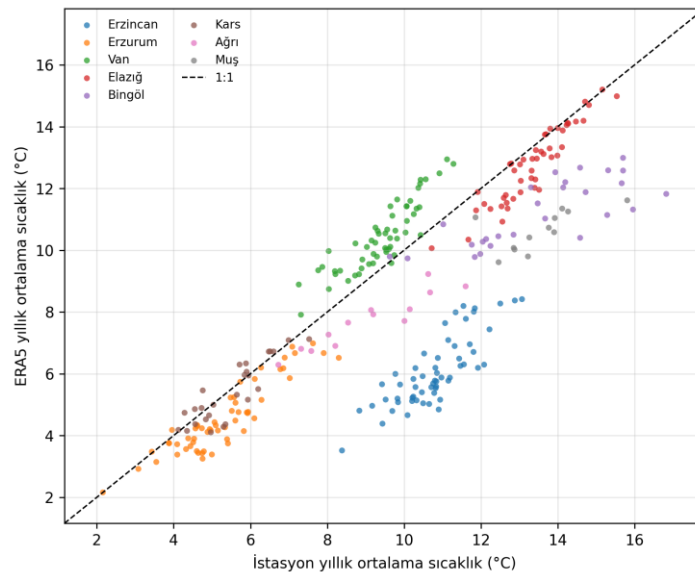
WMO normal dönemleri arasındaki fark, ısınmanın dönemselsel olarak güçlendiğini ortaya koymaktadır: 1991-2020 dönemi 1961-1990 döneminden 0,79 °C daha sıcaktır. 2021-2025 yıllarının 1991-2020 normalinin de 1,61 °C üzerinde seyretmesi, güncel sıcaklık koşullarının artık yalnızca tarihsel referansa göre değil, yakın dönem normaline göre de sıcak olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, kar örtüsü süresi, ilkbahar erimesi, tarımsal fenoloji ve sulama talebi gibi süreçlerin gelecekte daha ayrıntılı biçimde ele alınması gerektiğini desteklemektedir (Akyurek vd., 2023; Blau vd., 2024; IPCC, 2023).

ERA5 yeniden analiz verileri bölgesel ve mekansal karşılaştırma için güçlü bir kaynak sağlamakla birlikte, yüksek dağlık alanlarda yerel istasyon gözlemleriyle çapraz doğrulama yapılması sonuçların yorum gücünü artıracaktır. Türkiye üzerinde ERA5 saatlik sıcaklık verilerinin doğrulanmasına ilişkin bulgular bu veri setinin kullanılabilirliğini desteklese de 0,25° grid çözünürlüğü yerel vadi, bakı ve yükseklik etkilerini tam olarak temsil etmeyebilir (Hersbach vd., 2020; Yılmaz, 2022). Bu nedenle il düzeyindeki bulgular tek tek nokta değerleri olarak değil, bölgesel örüntü olarak yorumlanmalıdır. Bu örüntünün güvenilirliğini sınamak amacıyla ERA5 grid sıcaklıkları, bölgedeki bağımsız yer gözlemleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Tablo 7 ve Şekil 8'de görüldüğü gibi ERA5 yıllık ortalama sıcaklıkları istasyon gözlemleriyle güçlü biçimde uyumludur. Uzun kayıtlı istasyonlarda (Erzincan, Erzurum, Van, Elazığ, Kars) Pearson korelasyon katsayıları 0,82 ile 0,93 arasında olup tümü ileri düzeyde anlamlıdır ($p < 0,001$); daha kısa kayıtlı istasyonlarda da korelasyonlar anlamlıdır (Bingöl 0,77; Ağrı 0,94; en kısa kayıtlı Muş'ta 0,65). Eğilimden arındırılmış (yıllar arası) korelasyonların çoğunlukla 0,77-0,92 düzeyinde kalması, ERA5'in yalnızca ortak ısınma eğilimini değil yıldan yıla değişkenliği de yansıttığını gösterir. Erzurum'da ortalama fark yalnızca $-0,75$ °C iken, derin bir vadi tabanında yer alan Erzincan istasyonunda ERA5 grid ortalaması yaklaşık $4,7$ °C daha soğuktur; bu sistematik fark, grid hücresinin çevredeki yüksek araziye de içeren alan ortalamasını temsil etmesinden kaynaklanmakta ve mutlak sıcaklık düzeyinde alt-grid ölçekli yükseklik etkisinin önemini ortaya koymaktadır. Buna karşılık yüksek korelasyon, zamansal değişimin güvenilir biçimde yakalandığını gösterir. İstasyon ve ERA5 serileri aynı yönde ve anlamlı ısınma eğilimleri vermekte; ERA5 eğimleri bazı istasyonlarda bir miktar daha yüksek çıkmaktadır (ör. Erzurum'da istasyon $0,31$, ERA5 $0,37$ °C/10 yıl). Bu sonuçlar, çalışmada kullanılan ERA5 tabanlı eğilim bulgularının bölgesel düzeyde güvenilir olduğunu desteklemektedir.

Tablo 7. ERA5 yıllık ortalama sıcaklıklarının istasyon gözlemleriyle karşılaştırması. n: ortak yıl sayısı; r: Pearson korelasyonu (uzun kayıtlılarda $p < 0,001$, tümünde $p < 0,05$); r*: doğrusal eğilimden arındırılmış korelasyon; Fark: ERA5 eksi istasyon ortalaması (°C).

İl	n	Dönem	r	r*	Fark (°C)
Erzincan	58	1950-2024	0,82	0,78	-4,74
Erzurum	57	1951-2024	0,91	0,91	-0,75
Van	56	1958-2024	0,88	0,77	+1,01
Elazığ	48	1973-2024	0,93	0,87	-0,57
Bingöl	27	1999-2025	0,77	0,63	-2,31
Kars	26	1968-2024	0,88	0,91	-0,09
Ağrı	13	2011-2024	0,94	0,86	-1,36
Muş	12	2014-2025	0,65	0,79	-2,90



Şekil 8. Sekiz istasyonda ERA5 ve istasyon yıllık ortalama sıcaklıklarının karşılaştırması

Çalışmanın sınırlılıkları da bulunmaktadır. Yukarıdaki karşılaştırma ERA5'in zamansal değişkenliği iyi temsil ettiğini gösterse de, 0,25° grid çözünürlüğü dar vadiler, bakı farklılıkları ve yüksek zirveler gibi alt-grid ölçekli ayrıntıları tam olarak temsil edememekte; özellikle vadi tabanındaki istasyonlarda mutlak sıcaklıkta sistematik farklar oluşabilmektedir. Ayrıca istasyon kayıtları homojenlik düzeltmesine tabi tutulmamış ve karşılaştırma il merkezlerindeki istasyonlarla yapılmış olup Ardahan, Bitlis, Iğdır ve Tunceli illerinde GHCN-Daily istasyonu bulunmadığından bu iller doğrulama dışında kalmıştır. Bu nedenle il ölçeğinde anlamlılık eşiğine ulaşmayan eğilimler doğrudan grid çözünürlüğüne atfedilmemiş, istasyon karşılaştırmasıyla birlikte yorumlanmıştır. Gelecek çalışmalarda daha yoğun istasyon ağı, yükseklik düzeltmesi ve homojenleştirilmiş serilerle mevsimsel ölçekte ayrıntılı doğrulama yapılması önerilmektedir.

Sonuçlar

Doğu Anadolu Bölgesi'ni temsil eden ERA5 grid alanında 1950-2025 döneminde yıllık ortalama sıcaklıkta 0,28 °C/10 yıl düzeyinde anlamlı artış belirlenmiştir. Bütün mevsimlerde pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı eğilim görülmüş; en yüksek uzun dönem eğim yaz mevsiminde 0,35 °C/10 yıl olarak hesaplanmıştır.

Grid ve il bazlı analizler, bölge ortalamasının mekansal farklılaşmayı tek başına yansıtamadığını göstermiştir. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde anlamlı artış sinyali gridlerin çok büyük bölümüne yayılırken, kış mevsiminde anlamlı grid oranı daha düşük kalmıştır. İl düzeyinde Elazığ, Malatya, Hakkari, Erzurum, Kars ve Muş gibi iller mevsime bağlı olarak farklı eğilim büyüklükleri göstermiştir.

WMO standart normal dönemleri karşılaştırması, 1991-2020 döneminin 1961-1990 döneminden 0,79 °C daha sıcak olduğunu göstermiştir. 2021-2025 yılları ise 1991-2020 normalinin ortalama 1,61 °C üzerinde seyretmiştir. Ana sonuçlar uzun dönem eğilimi, WMO standart normal dönemleri ve güncel anomaliler üzerine kurulmuştur. Gelecek çalışmalarda ERA5 bulgularının il merkezi ve yüksek rakımlı istasyonlarla doğrulanması, ayrıca sıcaklık değişiminin kar örtüsü, akım rejimi ve tarımsal göstergelerle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma, Hakkari Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Ofisi tarafından desteklenmiştir (Proje No: FM19BAP).

Etik Kurulu Onayı ve Çıkar Çatışması

“Hazırlanan makalede hiçbir kişi veya kurumla çıkar çatışması bulunmamaktadır”

“Yazarlar, hazırlanan makaleyle ilgili olarak hiçbir kişi veya kurumla çıkar çatışması bulunmadığını beyan ederler.”

Yapay Zeka Kullanımına İlişkin Etik Bildiri

“Bu makalenin hazırlanması sırasında, “Google” tarafından geliştirilen “Gemini” adlı yapay zeka aracı, yalnızca dilbilimsel düzeltmeler amacıyla sınırlı ölçüde kullanılmıştır. Bilimsel içerik, analiz ve sonuçlar tamamen yazar(lar)ın sorumluluğundadır.”

Referanslar

- Acar, R. (2024). A comparison of the performance of different innovative trend assessment approaches for air temperature and precipitation data: An application to Elazığ Province (Turkey). *Journal of Water and Climate Change*, 15(3), 1417-1437. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.685>
- Akyurek, Z., Kuter, S., Karaman, Ç. H., & Akpınar, B. (2023). Understanding the Snow Cover Climatology over Turkey from ERA5-Land Reanalysis Data and MODIS Snow Cover Frequency Product. *Geosciences*, 13(10), 311. <https://doi.org/10.3390/geosciences13100311>
- Asikoglu, O. L., Alp, H., Temel, I., & Kamali, P. (2025). Examination of Long-Term Temperature Change in Türkiye: Comparative Evaluation of an Advanced Quartile-Based Approach and Traditional Trend Detection Methods. *Atmosphere*, 16(11), 1225. <https://doi.org/10.3390/atmos16111225>
- Ay, M. (2020). Trend and homogeneity analysis in temperature and rainfall series in western Black Sea region, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3-4), 837-848. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03066-6>
- Blau, M. T., Kad, P., Turton, J. V., & Ha, K.-J. (2024). Uneven global retreat of persistent mountain snow cover alongside mountain warming from ERA5-land. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 278. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00829-5>
- Ceyhunlu, A. I., & Ceribasi, G. (2024). Changes in precipitation and air temperature over Turkey using innovative trend pivot analysis method. *Journal of Water and Climate Change*, 15(5), 2446-2463. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.041>
- Copernicus Climate Change Service. (2018). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present* [Veri kümesi]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/CDS.ADBB2D47>
- Erlat, E., & Türkeş, M. (2012). Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010. *International Journal of Climatology*, 32(12), 1889-1898. <https://doi.org/10.1002/joc.2403>
- Esit, M., Yuce, M. I., Deger, İ. H., & Yasa, I. (2024). Trend and variability analysis in rainfall and temperature records over Van Province, Türkiye. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(1), 451-472. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04644-5>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8). <https://doi.org/10.1029/2006gl025734>
- Gümüş, V., Avşaroğlu, Y., Şimşek, O., & Doğan Dinsever, L. (2023). Evaluation of meteorological time series trends in Southeastern Anatolia, Turkey. *Geofizika*, 40(1), 51-73. <https://doi.org/10.15233/gfz.2023.40.3>
- Güngören, A., Özgür, E., Sünger, M. E., & Sakınç, M. (2026). Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde Ekstrem İklim Değişikliği İndekslerindeki

- Değişimlerin İncelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 439-459. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1757105>
- Hadi, S. J., & Tombul, M. (2018). Long-term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey. *Meteorological Applications*, 25(3), 445-455. <https://doi.org/10.1002/met.1712>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. bs.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th bs.). Charles Griffin.
- Keskin, M. E., & Saplıoğlu, K. (2023). Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesindeki Sıcaklık Eğilimlerinin Yenilikçi Trend Analizi ve Mann-Kendall ile Belirlenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology*, 5(1), 1-16.
- Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., Hannides, C., Lange, M. A., Tanarhte, M., Tyrllis, E., & Xoplaki, E. (2012). Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change*, 114(3-4), 667-687. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0418-4>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Menne, M. J., Durre, I., Vose, R. S., Gleason, B. E., & Houston, T. G. (2012). An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(7), 897-910. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-11-00103.1>
- Mersin, D., Tayfur, G., Vaheddoost, B., & Safari, M. J. S. (2022). Historical Trends Associated with Annual Temperature and Precipitation in Aegean Turkey, Where Are We Heading? *Sustainability*, 14(20), 13380. <https://doi.org/10.3390/su142013380>
- Pepin, N. C., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., & others. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424-430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

- Topuz, M. (2026). Trend of maximum temperatures in Türkiye according to provincial central stations (1927–2024). *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 14(2), 487-492. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v14i2.487-492.8562>
- Turkes, M., & Erlat, E. (2008). Influence of the Arctic Oscillation on the variability of winter mean temperatures in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 92(1-2), 75-85. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0310-8>
- Turkes, M., & Sumer, U. M. (2004). Spatial and temporal patterns of trends and variability in diurnal temperature ranges of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 77(3-4), 195-227. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0024-5>
- Türkeş, M., & Erlat, E. (2009). Winter mean temperature variability in Turkey associated with the North Atlantic Oscillation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 105(3-4), 211-225. <https://doi.org/10.1007/s00703-009-0046-3>
- Türkeş, M., & Erlat, E. (2018). Variability and trends in record air temperature events of Turkey and their associations with atmospheric oscillations and anomalous circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 38(14), 5182-5204. <https://doi.org/10.1002/joc.5720>
- Vogel, J., Paton, E. N., Aich, V., & Bronstert, A. (2021). Increasing compound warm spells and droughts in the Mediterranean Basin. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100312-100312. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100312>
- World Meteorological Organization. (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals* (WMO-No. 1203). World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/55797>
- Yılmaz, M. (2022). Türkiye Üzerinde ERA5 Saatlik Hava Sıcaklığı Verilerinin Doğrulanması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(2), 207-220. <https://doi.org/10.21324/dacd.1001820>
- Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., Fnais, M., Francis, D., Hadjinicolaou, P., Howari, F., Jrrar, A., Kaskaoutis, D. G., Kulmala, M., Lazoglou, G., Mihalopoulos, N., Lin, X., Rudich, Y., Sciare, J., Stenchikov, G., ... Lelieveld, J. (2022). Climate Change and Weather Extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics*, 60(3). <https://doi.org/10.1029/2021RG000762>

FDM Yöntemi ile Üretilen PLA Malzemesinin Üretim Parametrelerinin Yüzey Kalitesi, Geometrik Toleranslar ve Sertlik Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Optimizasyonu

Adem ŞAHİN^{1*}, Kaan Süleyman UZ¹, Fulya CEMALOĞLU²

¹Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Divriği Nuri Demirağ Meslek Yüksekokulu Sivas, 58300, Türkiye

²Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Erzincan, 24100, Türkiye

email: ademsahin@cumhuriyet.edu.tr

DOI: 10.57244/dfbd.1955308

Geliş tarihi/Received:20/05/2026

Kabul tarihi/Accepted:16/07/2026

Özet

Bu çalışmada, endüstriyel ve akademik alanda yaygın olarak tercih edilen Polilaktik Asit (PLA) malzemesi, Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) yöntemi kullanılarak, deney numuneleri; sabit katman yüksekliğinde (0,1 mm) farklı nozul sıcaklığında (200 °C, 210 °C, 220 °C ve 230 °C) ve farklı tarama stratejilerinde (Concentric, Rectilinear, Hilbert Curve ve Octagram Spiral) üretilmiştir. Üretim parametrelerinin, yüzey pürüzlülük değeri (Ra), sertlik (Shore D), boyutsal doğruluk ve çevresel sürdürülebilirlik arasındaki etkilerinin araştırılması ve optimize edilmesi amaçlanmıştır. Minitab programı ile Anderson-Darling (AD) testi uygulayarak güven testi yapılmış ve ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. Nozul sıcaklığındaki artışın, PLA malzemesinin reolojik davranışını iyileştirerek katmanlar arası adhezyonu güçlendirdiği ve boşluk oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yoğunluk (ρ) değerinin 220 °C nozul sıcaklığında Rectilinear tarama stratejisinde olduğu belirlenmiştir. En yüksek sertlik direnci ise dikey yüklere karşı homojen yapısıyla Hilbert Curve tarama stratejisi olmuştur. Düşük nozul sıcaklıklarında (200 °C) soğuma hızına bağlı olarak nominal değerin (25 mm) altında sonuçlar elde edilirken yüksek nozul sıcaklıklarında PLA malzemenin yayılmasıyla pozitif sapma gözlemlenmiştir. Üretim parametrelerinin çevresel maliyeti incelendiğinde tarama stratejilerinin karmaşıklığının karbon emisyonunu doğrudan etkilediği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler 3D Yazıcı, Yüzey Pürüzlülük Değeri (Ra), Sertlik (Shore D), Karbon Emisyonu, Geometrik Toleranslar.

Experimental Investigation and Optimization of the Effects of Manufacturing Parameters on Surface Quality, Geometric Tolerances, and Hardness of PLA Material Produced by FDM Method

Abstract

In this study, Polylactic Acid (PLA) material, which is widely preferred in industrial and academic fields, was used to produce test specimens using the Fused Deposition Modeling (FDM) method at a constant layer height (0.1 mm) with different nozzle temperatures (200 °C, 210 °C, 220 °C, and 230 °C) and different scanning strategies (Concentric, Rectilinear, Hilbert Curve, and Octagram Spiral). The aim was to investigate and optimize the effects of manufacturing parameters on surface roughness value (Ra), hardness (Shore D), dimensional accuracy, and environmental sustainability. Confidence testing was performed by applying the Anderson-Darling (AD) test using Minitab software, and ANOVA analysis was conducted. It was observed that the increase in nozzle temperature improved the rheological behavior of PLA material, strengthening interlayer adhesion and reducing the void ratio. The maximum density (ρ) value was determined to occur at 220 °C nozzle temperature with the Rectilinear scanning strategy. The highest hardness resistance was achieved with the Hilbert Curve scanning strategy due to its homogeneous structure against vertical loads. While results below the nominal value (25 mm) were obtained at low nozzle temperatures (200 °C) depending on the cooling rate, positive deviation was observed at high nozzle temperatures due to the spreading of PLA material. When examining the environmental cost of manufacturing parameters, it is evident that the complexity of scanning strategies directly affects carbon emissions.

Keywords: 3D Printer, Surface Roughness Value (Ra), Hardness (Shore D), Carbon Emission, Geometric Tolerances.

Giriş

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojileri içerisinde en geniş kullanım alanına sahip olan Eriyik Yığma Modelleme (FDM) yöntemi; üretim maliyetinin düşük olması, karmaşık geometrilere sahip tasarımların yüksek hassasiyetle üretilebilme kabiliyeti sayesinde hem endüstriyel uygulamalarda hem de akademik çalışmalarda stratejik bir öneme sahiptir. Ancak, bu yöntemle üretilen iş parçalarının mekanik performansı ve yüzey bütünlüğü, üretim öncesinde belirlenen parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değişim göstermektedir (Adanur vd., 2024; Sağbaş, 2018). Özellikle PLA (Polilaktik Asit) malzemelerin Eİ ile üretiminde, doluluk oranı, nozul sıcaklığı, katman yüksekliği, baskı hızı gibi üretim parametrelerinin üretilen malzemenin mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü ile olan bağlantısı, üretilen malzemenin endüstriyel performansını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır (Pinar vd., 2023; Kuruoğlu vd., 2022). Üretim parametrelerinin sistematik olarak kontrol edilmesi ve hedeflenen kalite standartlarına ulaşılabilmesi amacıyla; güncel çalışmalarda Taguchi deneysel tasarım metodolojisi ve ANOVA analizlerinden yararlanılarak; katman yüksekliği, doluluk oranı, yazdırma stratejisi, gibi faktörlerin yüzey pürüzlülüğü, ortalama sertlik değeri, geometrik ölçü tamlığı üzerinde baskın etkileri ve optimum proses parametrelerini belirlendiği görülmektedir (Yanar vd., 2026). Söz konusu optimizasyon süreçleri yalnızca yüzey kalitesi gibi teknik çıktıların iyileştirilmesini değil, aynı zamanda malzeme israfını ve enerji sarfiyatını minimize ederek imalat süreçlerinin sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hale getirilmesini de hedeflemektedir. Bu çalışmada; FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinin yüzey kalitesi, geometrik toleransları, yoğunluğu, üretim anında tüketilen enerji miktarı ve ortalama sertlik değeri üzerindeki üretim parametrelerinin etkilerinin deneysel olarak belirlemeyi ve optimize etmek hedeflenmektedir. Bu kapsamda; sabit katman yüksekliğinde, farklı nozul sıcaklıklarında, sabit tabla sıcaklığında, farklı tarama stratejilerinin; yüzey pürüzlülük değeri (Ra) yoğunluk (ρ), ortalama sertlik (Shore D), üretim anındaki karbon emisyonu ($CE\ g/CO_2$) ve yüzeyler arası mesafe (mm) gibi kritik karakteristikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilerek, yüksek performanslı üretim için optimum proses koşulları belirlenmesi amaçlanmaktadır. Mevcut literatür verileri incelendiğinde; FDM proses değişkenliklerinin mekanik karakteristikler üzerindeki etkilerinin sıklıkla Taguchi metodolojisi ve ANOVA Varyans analizi edildiği görülmektedir (Nas, 2024). Yapılan bu araştırmalar, özellikle doluluk oranının, çekme mukavemeti ve kırılma direnci gibi temel mekanik özellikler üzerinde en etkili ve belirleyici parametre olduğunu ortaya koymaktadır (Kumar vd., 2023; Benali vd., 2023). Literatürdeki güncel çalışmalar bu yaklaşımı desteklemekte; örneğin Taguchi L9 metodolojisiyle yürütülen çalışmalarda, katman yüksekliğinin çekme dayanımı üzerinde yaklaşık %70 gibi baskın bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, yüzey sertliği karakterizasyonuna da katman yüksekliğinin yaklaşık %97 istatistiksel güvenirlilik düzeyi ile en belirleyici parametre olduğu belirlendiği görülmektedir (Yanar vd., 2026). Elde edilen bu bulgular, FDM yöntemiyle üretilen PLA esaslı bileşenlerin yapısal bütünlüğünü ve mekanik performansını maksimize etmek adına katman yüksekliğinin önemli bir kontrol değişkeni olduğunu göstermektedir. Literatürde Taguchi metodolojisinin; porozite, tarama stratejisi ile üretim oryantasyonu gibi çok sayıda proses parametresinin

optimizasyonunda kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; bu yaklaşımın yalnızca mekanik dayanımı artırmakla kalmadığı, aynı zamanda boyutsal hassasiyeti iyileştirme ve termal kaynaklı çarpılma deformasyonunu minimize etme hususunda da yüksek bir etki sergilediği görülmektedir (Batu vd., 2023). Literatürdeki bu metodolojik çeşitliliği destekleyen diğer araştırmalar; FDM üretim parametrelerinin PLA esaslı numunelerinin çekme mukavemeti, akma dayanımı ve ağırlık gibi karakteristikleri üzerindeki etkilerini Taguchi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemlerini entegre ederek incelendiği görülmektedir. Bu çalışmalar, çok kriterli karar verme süreçlerinin üretim kalitesini stabilize etmedeki etkinliğini belirlemektedir (Toprak vd., 2024). Genel olarak bu tür metodolojiler, deney sayısını kayda değer oranda azaltarak yüksek maliyetli ve zaman alıcı tam faktöriyel deney tasarımlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır (Kartal vd., 2018). Bu bağlamda Taguchi optimizasyon teknikleri; mekanik karakteristikler ve üretim maliyeti gibi çoklu çıktı hedefleri üzerindeki parametre etkilerini sistematik olarak analiz ederek, ideal kombinasyonların belirlenmesinde operasyonel bir araç olarak kabul edilmektedir. Bu çerçevede, Taguchi metodolojisinin FDM sürecinde birden fazla performans kriterinin eş zamanlı optimizasyonu için sunduğu avantajlar; üretim süreçlerindeki değişkenliği yönetmek ve hedeflenen malzeme karakteristiklerini hassas bir şekilde elde etmek adına stratejik bir önem taşımaktadır (Patel vd., 2024). Literatürdeki bu temel ihtiyaçtan hareketle; FDM yöntemi ile üretilen PLA numunelerinin, üretim parametrelerinin; yüzey kalitesi, geometrik toleransları ve ortalama sertlik değerleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmesi hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında, İş parçaların sadece yüzey kalitesinin ötesinde, endüstriyel montaj ve fonksiyonellik için kritik olan yüzeyler arası mesafe (mm) ve geometrik toleransların belirlenmesi, farklı tarama stratejilerinin deney numunelerinin mekanik ve fiziksel etkilerini kıyaslamak, çok faktörlü bir optimizasyon yöntemi kullanılarak performans kriterlerini maksimize eden en uygun parametre kombinasyonları belirlenerek, gerçekleştirilen bu analizlerin, Eİ süreçlerinde sıklıkla karşılaşılan parametre etkileşimlerini açıklığa kavuşturulması ve endüstriyel uygulamalarda optimum üretim koşullarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Materyal ve Yöntem

Deney Numunesi Üretimi ve Ölçümleri

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle üretilen deney numunelerinin boyutsal hassasiyeti, yüzey pürüzlülük değeri, yoğunluk, sertlik ve üretim anında 3D yazıcının enerji tüketimini incelemek amacıyla Polilaktik Asit (PLA) esaslı 25x25x25 mm boyutlarında deney numuneleri üretilmiştir. Eklemeli imalat sürecinde ham madde olarak Porima firmasına ait 1,75 mm çapında Porima Eco Smart PLA filament tercih edilmiştir. Üretim esnasında nem kaynaklı gözeneklilik, çapaklanma ve yüzey pürüzlülüğü hatalarını önlemek için, filament ekstrüzyon işlemi öncesinde kurutularak nemden arındırılmıştır. Deney tasarımının kurgulanmasında ve üretim parametresi kombinasyonlarının optimizasyonunda Taguchi L16 ortogonal dizisi esas alınmıştır. Eklemeli imalat sürecinde çıktı değişkenleri üzerinde etkileri incelenen bağımsız girdi parametreleri; dört farklı nozul sıcaklığı (200, 210, 220 ve 230 °C) ve dört farklı tarama stratejisi (Concentric, Rectilinear, Hilbert Curve ve Octogram Spiral) olarak belirlenmiştir. Deney matrisinin oluşturulmasında kullanılan kontrol faktörleri ve bunlara ait seviyeler Tablo 1’de, deney numunesi işlem parametreleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

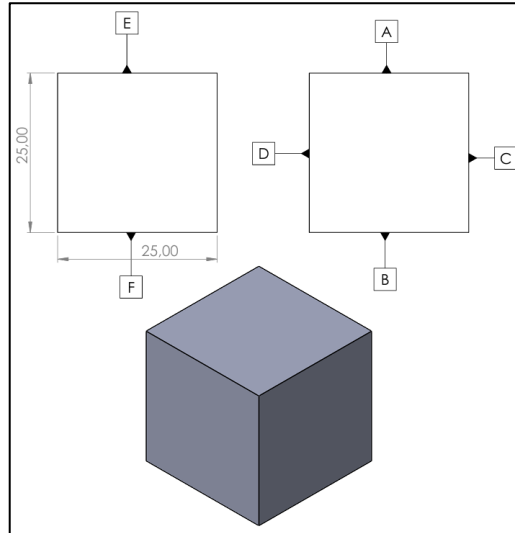
Tablo 1. Üretim parametreleri için kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Semboller	Kontrol Faktörleri	Birimler	Seviyeler			
			Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Nozul Sıcaklığı	(°C)	200	210	220	230
B	Tarama Stratejisi	-	Concentric	Rectilinear	Hilbert Curve	Octogram Spiral
C	Katman Yüksekliği	(mm)	0,1			

Tablo 2. Deney numunelerinin üretim parametreleri.

Üretim Parametreleri	Değer
Tarama açısı	(-45/45), (0/90)
Doluluk oranı (%)	100
Baskı hızı (mm/s)	250
Nozul sıcaklığı (°C)	200,210,220,230
Tabla sıcaklığı (°C)	50
Ortam sıcaklığı (°C)	25
Alt katman sayısı	2
Üst katman sayısı	2
Destek durumu	Yok
Tabla kaplaması	PEI (Polyetherimide)
Nozul Çapı (mm)	0,4
Katman yüksekliği	0,1
Boşta gezme hızı (mm/s)	250
Dilimle programı	Crealiti Print 5.1

Belirlenen bu parametre kombinasyonlarına göre CAD (SolidWork) ortamında tasarlanan deney numuneleri, FDM tipi (Crealiti K1 Max) üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Boyutsal hassasiyet ve mikro sapma analizlerinin üç boyutlu olarak yüksek doğrulukta belirlenmesi amacıyla, deney numuneleri üzerinde özel ölçüm yüzeyleri belirlenmiştir. Tasarlanan CAD modeli ve deney numunesi üzerinde belirlenen yüzeyler Şekil 1’de verilmiştir.

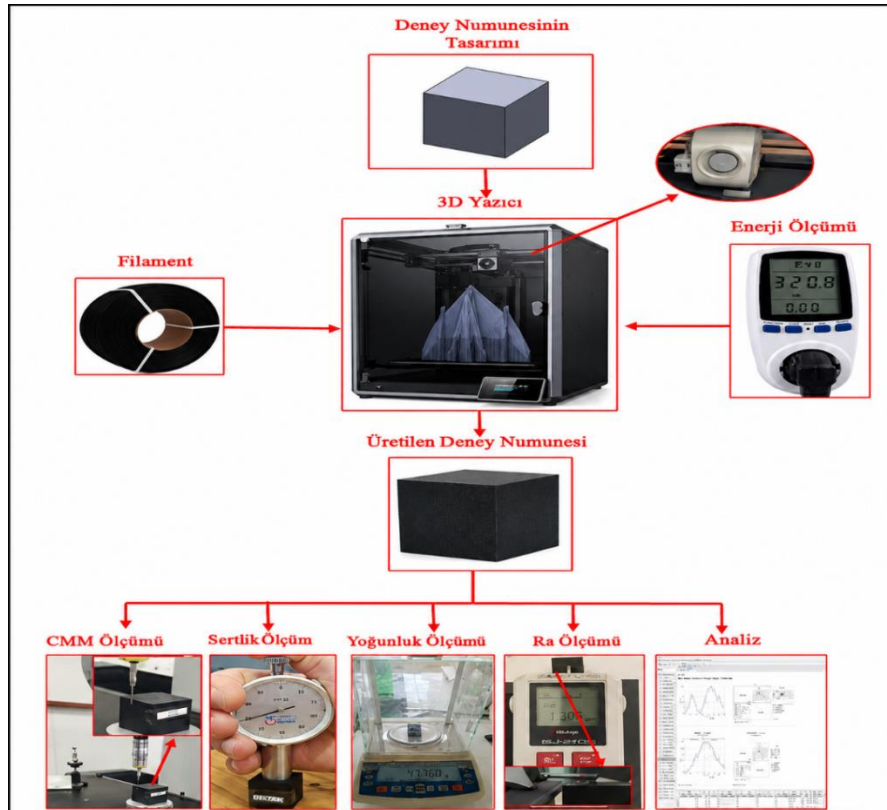
**Şekil 1.** Üretilen parçanın teknik resmi ve geometrik toleransların tanımı.

Üretilen deney numunelerinin geometrik toleransları ve ölçümlerinin kontrolünde; geleneksel ölçüm yöntemlerinin getirebileceği operatör kaynaklı hataları önlemek ve mikron mertebesinde doğruluk sağlamak adına 1 µm ölçüm hassasiyetine sahip, Hexagon firması tarafından üretilen DEA Global Performance 10.7.7 Koordinat Ölçüm Cihazı (CMM) kullanılmıştır. Deney numuneleri üzerinde A-B, C-D ve E-F yüzeyleri arasındaki mesafeler,

CMM cihazının hassas dokunmatik probu vasıtasıyla, parça referans düzlemleri üzerinde otomatik olarak taranmış ve boyutsal hassasiyet verileri belirlenmiştir. Üretilen deney numunelerinin yüzey kalitesini belirlemek amacıyla elmas uçlu Marh MarSurf PS1 taşınabilir yüzey profilometre cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ölçümleri yapılmıştır. Deney numunelerinin katı formdaki gerçek ve bağıl yoğunlukları, Arşimet prensibine dayalı sıvı kaldırma kuvveti yöntemiyle belirlenmiştir. Bu ölçümlerde, mikro ölçekli kütle değişimlerinin hassas bir şekilde tespit edebilmek adına 0,1 mg (0,0001) hassasiyetine sahip hassas terazi ve buna bağlı yoğunluk belirleme kiti kullanılmıştır. Üretilen deney numunelerinin sertliklerinin tespit etmek amacıyla, polimer esaslı malzemelerin karakterizasyonuna uygun olarak ASTM D2240 standardı kullanılarak Shore D sertlik ölçüm cihazı ile deney numuneleri üzerinde beş farklı noktadan sertlik ölçüm sonuçları aritmetik ortalamaları alınarak deney numunelerinin sertlik değerleri belirlenmiştir. Üretim parametrelerinin sadece fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik boyutundaki etkileri de değerlendirilmiştir. FDM yöntemiyle gerçekleştirilen üretim sürecinde oluşan karbon ayak izi temel olarak yazıcının operasyonel enerji tüketimi ile doğrudan ilişkilidir. Karbon emisyonu değerlerinin hesaplanmasında, her bir deney kombinasyonu (nozul sıcaklığı, tarama stratejisi ve basım süresi) için cihazın toplam enerji tüketimi (E) temel alınmıştır. Karbon emisyonu hesaplamasında bağıntı 2.1 kullanılmıştır.

$$CO_2(g) = E(kWh) \times EF \quad (2.1)$$

Bu bağıntıda E baskı süresi boyunca tüketilen toplam elektrik enerjisi; EF ise kullanılan elektrik şebekesinin birim enerji başına karbon yoğunluğunu temsil etmektedir (Aydın vd., 2025). Yapılan çalışmada izlenen deney prosedürü Şekil 2’de verilmiştir. Deneysel tasarım, tam faktöriyel ($4 \times 4 = 16$) içermektedir. Her kombinasyon için üç tekrar hazırlanarak toplam 48 deney numunesi üretilmiştir.



Şekil 2. Deney prosedürü.

Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde, FDM yöntemiyle belirlenen üretim parametreleriyle üretilmiş olan PLA deney numunelerinin boyutsal, fiziksel, mekanik ve çevresel sürdürülebilirlik sonuçlarından elde edilen veriler değerlendirilmektedir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler Tablo 3’de verilmektedir.

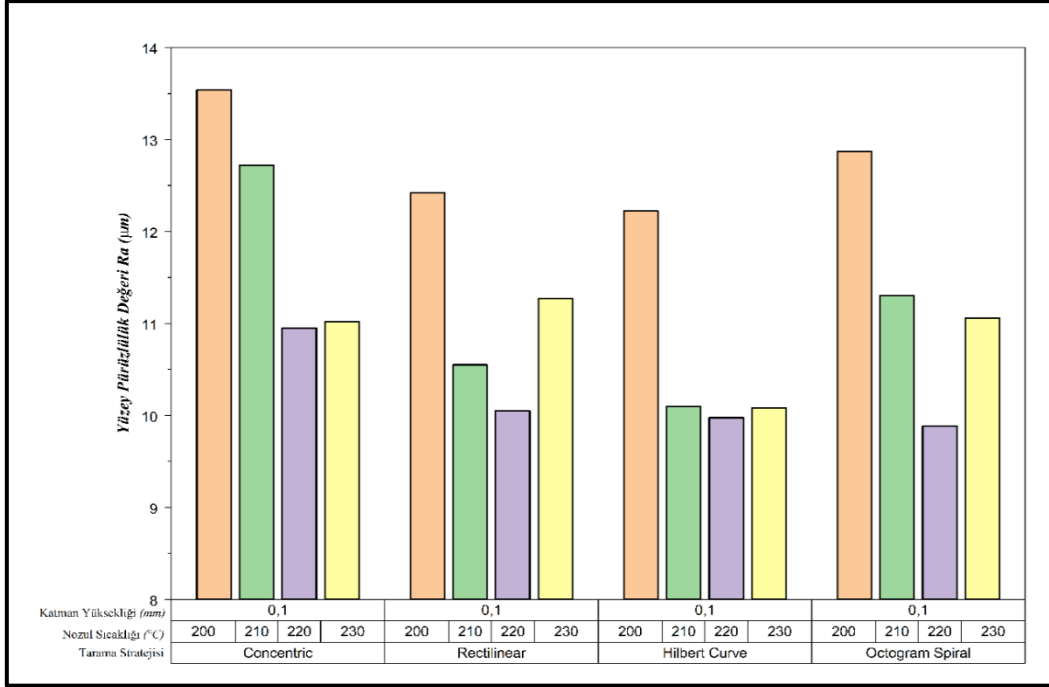
Tablo 3. Deneysel çalışmalar sonucunda üretim parametrelerine bağlı sonuçlar.

Deney No	A-B Mesafesi	C-D Mesafesi	E-F Mesafesi	Ra (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertlik (Shore D)	Karbon Emisyonu (CE g/CO ₂)
1	24.93	25.2	25.04	13.54	94.53295	76.67	2.10584
2	24.96	24.84	24.9	12.42	94.04226	76	2.09001
3	24.82	24.92	24.73	12.22	93.00569	77.33	4.08238
4	24.96	24.87	24.99	12.87	92.94702	75.33	2.43702
5	25.4	25.17	25.18	12.72	93.14889	75.67	2.18584
6	25.1	24.89	24.98	10.55	95.38524	76.33	2.09501
7	24.94	24.93	25	10.099	95.35737	77.33	4.10138
8	24.98	25	25.26	11.3	94.05428	76.67	2.53902
9	25.21	25.15	25.2	10.95	94.36761	77.33	2.19124
10	25.12	24.94	25.17	10.05	97.79398	76.33	2.14499
11	25.09	24.93	24.98	9.974	96.60375	78	4.18978
12	25.13	24.98	25.1	9.887	94.81098	77.33	2.70114
13	25.26	25.1	25.12	11.02	94.09964	77	2.21666
14	25.04	25.14	25.02	11.27	93.63024	77.67	2.2
15	25.12	25.05	25.09	10.08	95.78766	79	4.29722
16	25.06	24.97	25.06	11.06	93.55049	78.33	2.86528

Üretim Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülük Değeri (Ra) Üzerindeki Etkisi

PLA malzemesinden FDM yöntemiyle üretilen deney numunelerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, kontrol faktörleri olan nozul sıcaklığı ve tarama stratejisine bağlı olarak minimum ve maksimum değişimleri (sırasıyla 9,887 µm ve 13,54 µm) Şekil 3’de verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde sabit katman yüksekliğinde (0,1 mm) hem nozul sıcaklığının hem de tarama stratejisinin yüzey kalitesi üzerinde oldukça belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir. Nozul sıcaklığının 200 °C olarak belirlenen tüm tarama stratejilerinde yüzey pürüzlülük değerinin yüksek çıkması PLA malzemesinin dinamik viskozitesinin yüksek kalması ve bu durumunda katmanlar arası birleşmenin tam olarak gerçekleşmediğini ve katmanlar arasında derin girinti ve çıkıntıların oluşmasını sağladığı düşünülmektedir. Ancak nozul sıcaklığının 200 °C’den 220 °C’ye çıkarıldığında tüm tarama stratejilerinde yüzey pürüzlülük değerinde (Ra) belirgin bir azalma (iyileşme) görülmektedir. Nozul sıcaklığındaki artışın PLA malzemesinin viskozitesini düşürerek, yayılma kabiliyetini artırması ve katmanlar arasındaki birleşmeyi artırmasıyla açıklanabilmektedir. Ancak nozul sıcaklığının 230 °C’ye çıkarılması tüm tarama stratejilerinde yüzey pürüzlülük değerinde az da olsa bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Bu artışın aşırı sıcaklığın neden olduğu kontrolsüz akış veya malzemenin termal kararlılığındaki değişimle açıklanabilir (Caputo vd., 2022). Tarama stratejileri karşılaştırıldığında en düşük yüzey pürüzlülük değeri 220 °C’de Hilbert Curve ve Octagram Spiral tarama stratejilerinde (sırasıyla 9,887 µm ve 9,974 µm) elde edildiği görülmektedir. Bu tarama stratejileri yüzey pürüzlülük değeri için en ideal üretim koşullarını göstermektedir. Bu sonuçlar üretim parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini destekleyen güncel araştırmalar ile uyum

göstermektedir (Golhin vd., 2023; Caputo vd., 2022). Yapılan istatistiksel analiz sonucunda nozul sıcaklığının yüzey pürüzlülük değeri üzerindeki etkisinin %68,23 tarama stratejisini ise %21,63 olduğu belirlenmiştir.

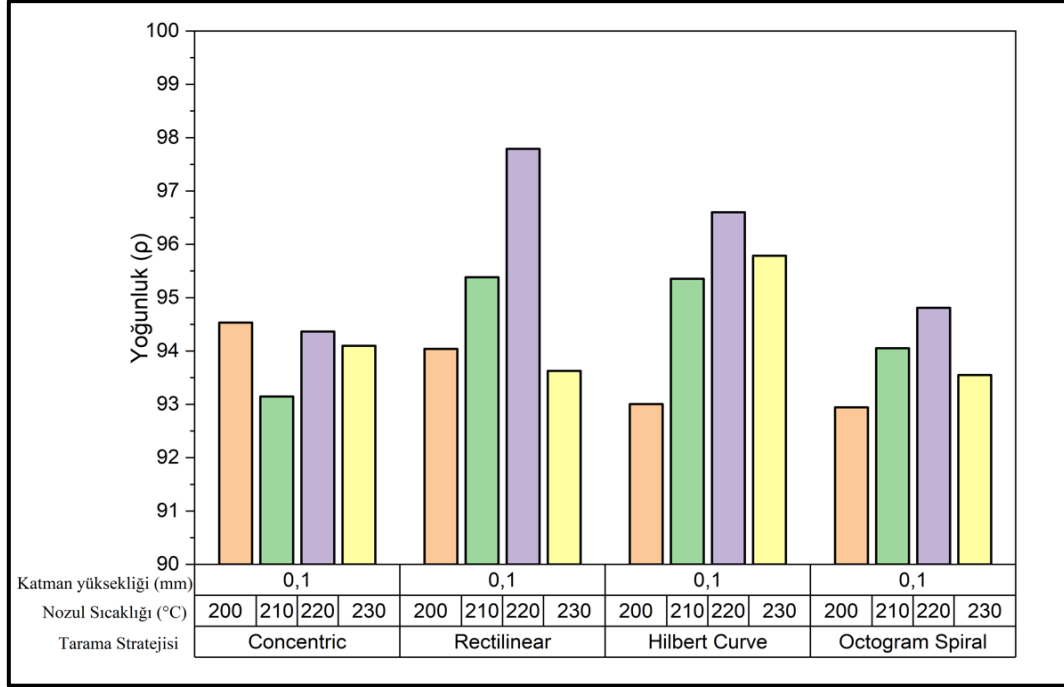


Şekil 3. Deney numunelerinin yüzey pürüzlülük değeri (Ra) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin Bağlı Yoğunluk (ρ) Üzerindeki Etkisi

FDM yöntemiyle farklı parametrelerde üretilen PLA numunelerinin yoğunluk (ρ) değerinin, nozul sıcaklığı ve tarama stratejisine bağlı değişimini gösteren grafik Şekil 4'de verilmiştir. Grafikte, nozul sıcaklığının 200 °C'den 220 °C'ye çıkarılmasıyla tüm tarama stratejilerinde yoğunluk değerinin arttığı görülmektedir. Sıcaklık artışı PLA malzemenin viskozitesini düşürerek malzemenin daha akışkan hale gelmesini sağlayarak, katmanların birbirine daha iyi birleşimini, yani katmanlar arası bağın artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda PLA malzemesinin yayılma kabiliyeti arttığı için üretim esnasında oluşan mikro boşluklar daha etkin şekilde dolarak, toplam yoğunluğun %98,8 seviyelerine (Rectilinear tarama stratejisinde 220 °C'de) çıkmasını sağladığı görülmektedir. Ancak, nozul sıcaklığı 230 °C'ye çıkıldığında, yoğunluk değerinde gözlemlenen düşüş, PLA malzemenin aşırı ısınması sonucu oluşan termal genleşme ve polimer zincirlerindeki olası degradasyonun yapısal bütünlüğü olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir (Sing, 2025). Farklı tarama stratejilerinin yoğunluk üzerinde belirgin bir hiyerarşi oluşturduğu görülmektedir. Rectilinear tarama stratejisi 220 °C'de en yüksek yoğunluk değerini sunan strateji olduğu görülmektedir. Bu strateji ekstrüzyon yollarının doğrusal ve birbirine paralel ilerlemesi, hava boşluklarının en aza indirilmesiyle en efektif sonuçlar görülmüştür. FDM yöntemiyle üretim sürecinde, yoğunluğun sadece malzeme miktarıyla değil, nozul sıcaklığının kontrol ettiği davranış ve tarama stratejisinin kontrol ettiği katman dizilişi ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir. (Singh, 2026; Caputo vd., 2022). Yapılan

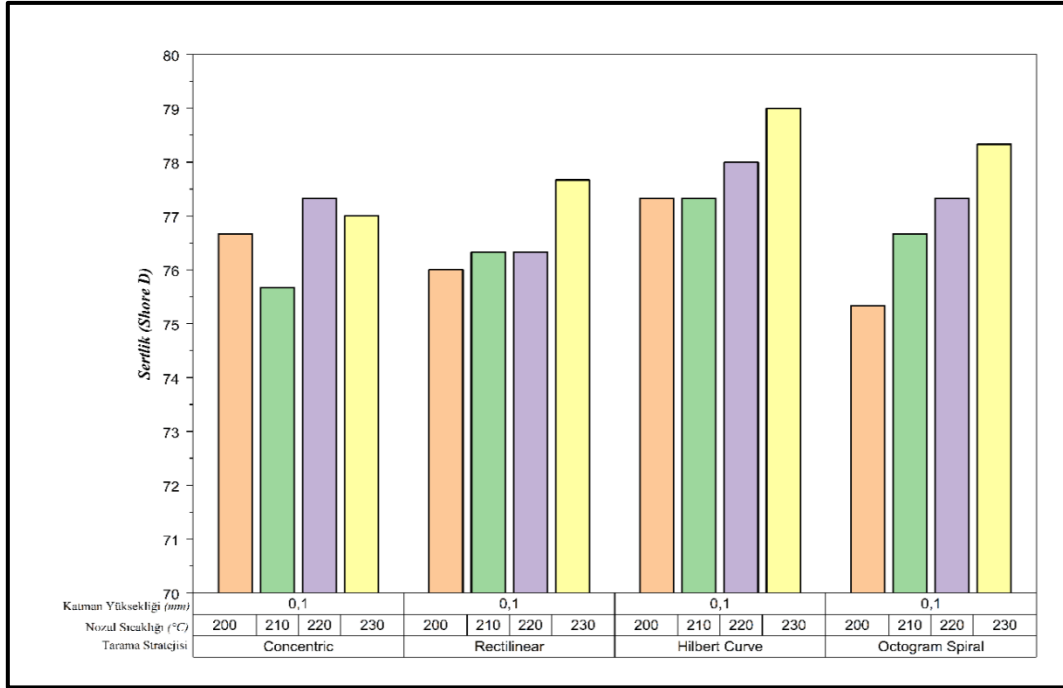
istatistiksel analiz sonucunda nozul sıcaklığının yoğunluk üzerindeki etkisinin %40,19 tarama stratejisini ise %23,71 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. Deney numunelerinin bağıl yoğunluk (ρ) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin Sertlik (Shore D) Üzerindeki Etkisi

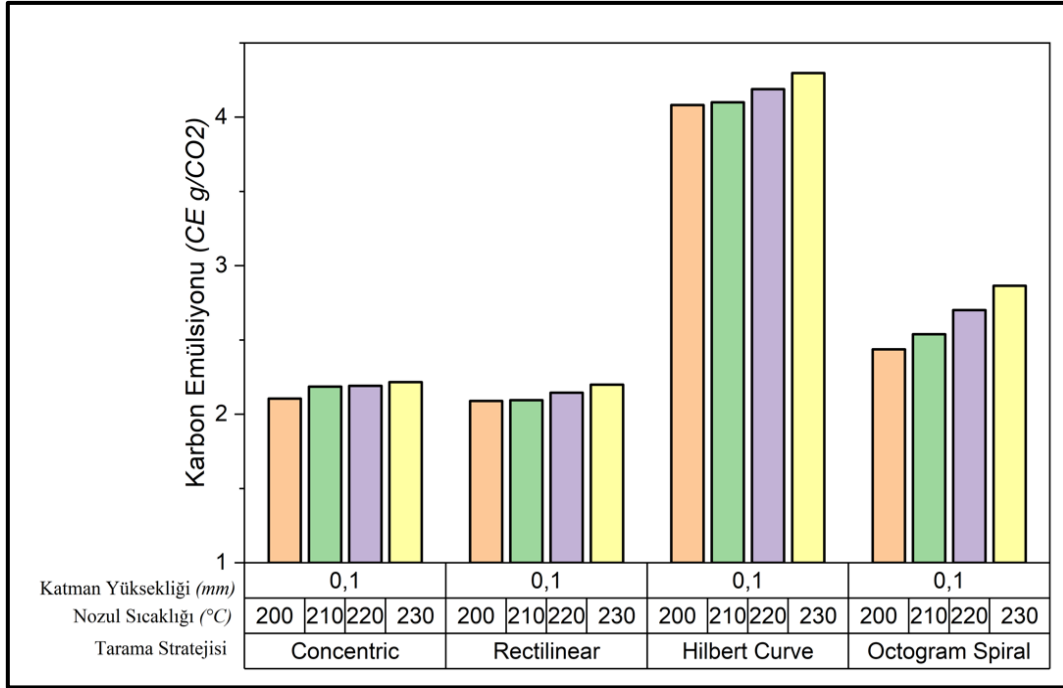
FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinin Shore D sertlik değerlerinin üretim parametrelerine (nozul sıcaklığı ve tarama stratejisi) bağlı olarak değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde nozul sıcaklığı arttıkça deney numunelerinin sertlik değerinde bir artış gözlemlenmiştir. Nozul sıcaklığının 200 °C’den 230 °C’ye çıkarılması PLA malzemenin reolojik özelliklerini iyileştirerek katmanlar arası difüzyonu ve moleküler bağ enerjisini artırdığı düşünülmektedir (Caputo vd., 2022). Bu durum, katmanların birbirine daha sıkı birleşmesini sağlayarak deney numunelerinin basma ve batma direnci olan sertlik değerini artırdığı görülmektedir. Deney sonuçlarına göre en yüksek sertlik değeri (79 Shore D) Hilbert Curve tarama stratejisinde 230 °C’de görülmektedir. Bu tarama stratejisinin, karmaşık ve iç içe geçen geometrik yapısı, dikey yüklemelere karşı daha homojen bir direnç gösterdiği düşünülmektedir. Bu durum karmaşık dolgu desenlerinin mekanik özelliklerini artırdığını kanıtlamaktadır (Rankouhi vd., 2016). Katman yüksekliğinin 0,1 mm olması, her bir katmanın alt katmana uyguladığı termal enerjiyi artırarak genel sertlik seviyesinin (75-79 Shore D arasında) artmasını sağlamaktadır. Maksimum numune sertliği için 230 °C nozul sıcaklığı ile birlikte Hilbert Curve tarama stratejisinin kullanılmasının en ideal üretim parametresi olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda nozul sıcaklığının sertlik üzerindeki etkisinin %49,03 tarama stratejisini ise %31,50 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Deney numunelerinin sertlik (Shore D) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin Karbon Emisyonu (CE g/CO₂) Üzerindeki Etkisi

FDM yöntemiyle PLA numunelerin üretim sürecinde üretim parametrelerinin, (nozul sıcaklığı ve tarama stratejileri) karbon emisyonu (CE g/CO₂) değerleri üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tüm tarama stratejilerinde nozul sıcaklığı arttıkça karbon emisyonu değerinin arttığı görülmektedir. FDM sürecinde nozul sıcaklığının artırılması, ısıtıcı sistemin hedef sıcaklığı koruması için daha fazla elektrik enerjisi tüketmesine neden olduğu düşünülmektedir. Bu durumu literatürde, nozul sıcaklığının elektrik tüketimi ve dolayısıyla karbon emisyonları üzerinde en etkili parametrelerden biri olduğu vurgulanmaktadır (Priyamal vd., 2024). Nozul sıcaklığının 200 °C'den 230 °C'ye çıkarılmasıyla emisyon değerlerindeki artış net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, sürdürülebilir üretim için sıcaklık ve enerji tüketimi arasındaki dengenin optimize edilmesi gerektiğini doğrulamaktadır (Vidakis vd., 2023). Grafikte en çarpıcı bulgu, tarama stratejisinin karbon emisyonu üzerinde etkisini göstermektedir. Hilbert Curve yazdırma stratejisi, diğer yazdırma stratejilerine göre yaklaşık iki kat daha fazla karbon emisyonuna (4,1 CE g/CO₂) neden olmaktadır. Bu durum, tarama stratejisinin karmaşık yol geometrisiyle birlikte nozulun daha fazla ivmelenme/yavaşlama hareketi yapmasına ve baskı süresinin uzamasına neden olmaktadır. Bu durum, toplam enerji tüketimini ve karbon emisyonunu artırmaktadır. Sonuçlar incelendiğinde, FDM sürecinde çevresel sürdürülebilirliğinin sadece malzeme türüne göre değil, belirlenen üretim parametrelerine bağlı olduğunu göstermektedir. Katman yüksekliğinin 0,1 mm olması, birim hacim başına düşen katman sayısı ve dolayısıyla toplam baskı süresini artırdığı için, üretim parametreleri seçiminde karbon emisyonu üzerindeki etkisi çok daha belirgin hale gelmektedir. Maksimum sürdürülebilirlik (minimum karbon emisyonu) için düşük nozul sıcaklığı ile birlikte toplam baskı süresini düşüren tarama stratejilerinin tercih edilmesi önerilmektedir (Tiwari vd, 2023).

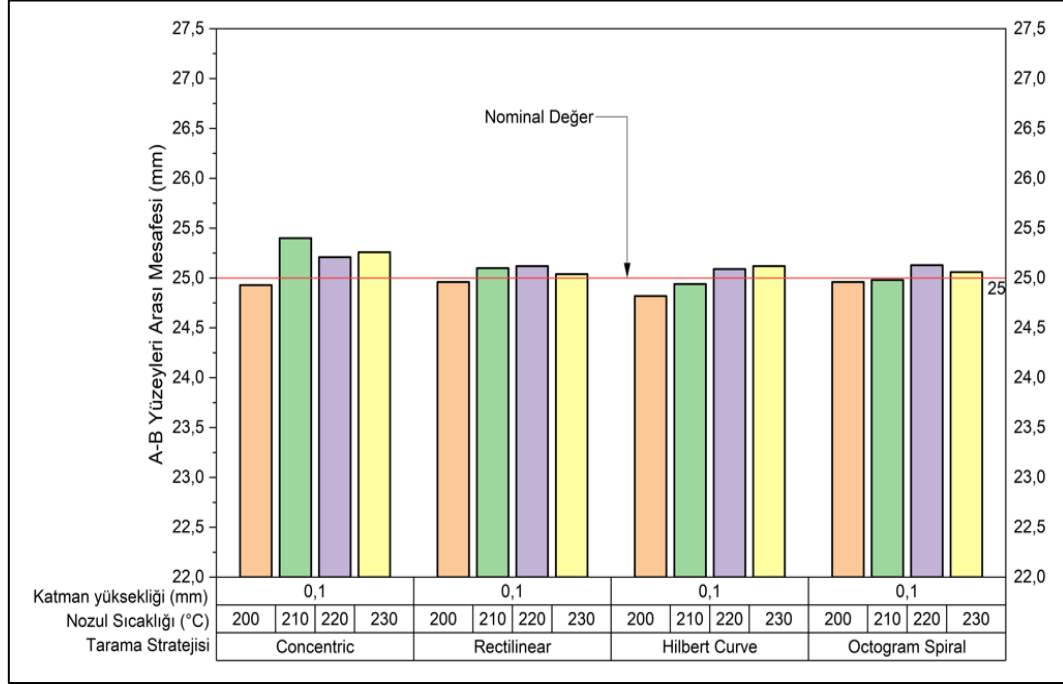


Şekil 6. Deney numunelerinin üretim anındaki karbon emisyon (CE g/CO₂) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin A-B Yüzeyleri Arasındaki Mesafe (mm) Üzerindeki Etkisi

FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinin boyutsal doğruluğu (A-B yüzeyleri arasındaki 25 mm nominal mesafe üzerinden) üretim parametrelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 7’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, nozul sıcaklığındaki artışın numune boyutlarını genellikle nominal değerin (25 mm) üzerinde çıkarma eğilimde olduğu görülmektedir. Nozul sıcaklığının 200 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılan deneylerde üretilen numuneler genellikle nominal değerin altında (yaklaşık 24,8-24,9 mm) kalırken, nozul sıcaklığı arttıkça yüzeyler arası değerler 25 mm eşiğini aşmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda polimer viskozitesinin düşmesi sonucu, malzemenin daha fazla yayılması ve termal genleşme katsayısının etkisiyle açıklanabilir. Düşük nozul sıcaklıklarında üretilen numunelerin, yüzeyler arası mesafede görülen nominal altı değerler, katmanlar arası soğuma sırasında, oluşan termal gerilmelerin çekme etkisinden olduğu düşünülmektedir. Farklı tarama stratejilerinin, yüzeyler arası nominal değerden (25 mm) belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu stratejiler arasında yer alan Concentric tarama stratejisi özellikle 210 °C ve üzerinde en yüksek sapmayı (yaklaşık 25,4 mm) sergileyerek nominal değerden en çok uzaklaşan tarama stratejisi olmuştur. Bu stratejide dairesel merkezli yolların izlenmesi, malzemenin dış yüzeylere doğru yığılmasına ve boyutsal toleransların aşılmasına neden olduğu düşünülmektedir. Tarama stratejileri arasında nominal değere en yakın stratejiler ise Rectilinear ve Octagram Spiral olduğu görülmektedir. Bu iki strateji 200 °C ve 220 °C aralığında 25 mm çizgisine en yakın değerleri vererek en yüksek boyutsal doğruluğu göstermişlerdir. Özellikle Octagram Spiral tarama stratejisi 200 °C ve 210 °C sıcaklıklarda, nominal değere tam uyum sağladığı görülmektedir. Bu, tarama stratejisinde doğrusal ve çapraz geçişli yolların, termal gerilmeleri daha homojen dağıtarak boyutsal kararlılığı korumasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hassas

tolerans gerektiren üretimler için Rectilinear ve Octagram Spiral tarama stratejilerinin 200 °C ve 220 °C nozul sıcaklıklarında kombinlenmesi, A-B yüzeyleri arasındaki boyutsal sapmayı minimize etmek adına en kararlı üretim parametreleri olarak görülmektedir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda, nozul sıcaklığının, A-B yüzeyler arası mesafesi üzerindeki etkisi %41,12, tarama stratejisini ise %31,99 olduğu belirlenmiştir.

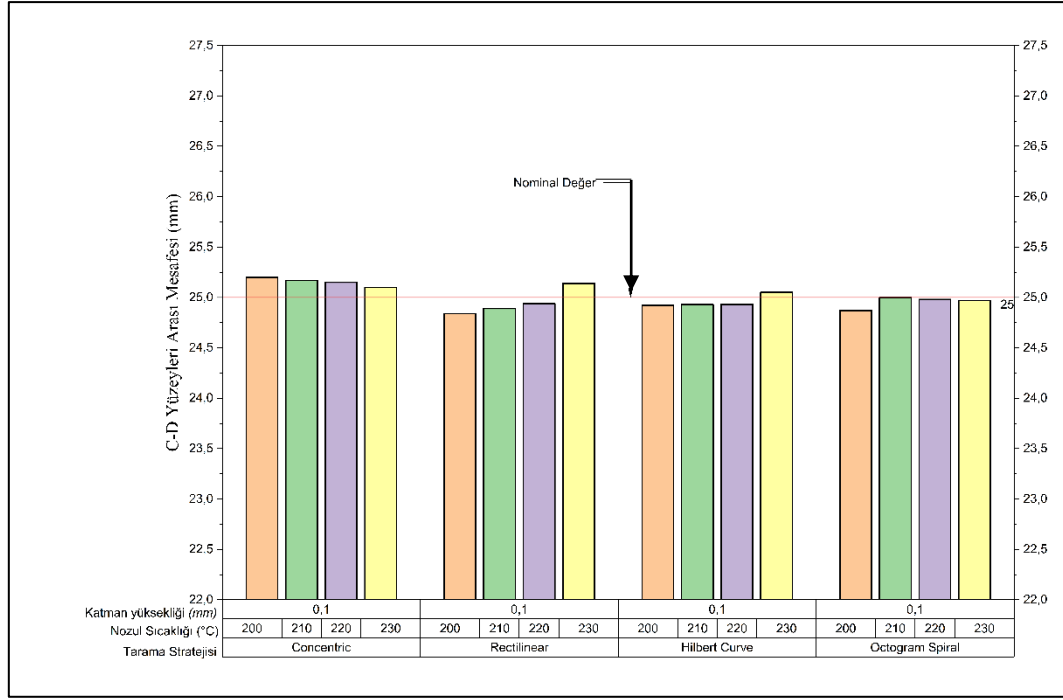


Şekil 7. Deney numunelerinin A-B yüzeyleri arasındaki mesafe (mm) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin C-D Yüzeyleri Arasındaki Mesafe (mm) Üzerindeki Etkisi

FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinin boyutsal doğruluğunu (C-D yüzeyleri arasındaki 25 mm nominal mesafe üzerinden) üretim parametrelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 8’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde nozul sıcaklığının artışının C-D yüzeyleri arasındaki boyutsal ölçümlerin nominal değere (25 mm) yaklaştığı ve bazı tarama stratejilerinde ise nominal değerın üzerine çıktığı görülmektedir. Nozul sıcaklığının 200 °C gibi düşük sıcaklıklarda, özellikle Rectilinear ve Hilbert Curve tarama stratejilerinde ölçülen değerler nominal değerin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, düşük sıcaklıktaki ekstrüzyonun ardından malzemenin soğuması sırasında oluşan iç gerilmelerin malzemede çekme gerilmesi ile açıklanabilir. Malzeme akışkanlığının ve yayılma oranının arttığı nozul sıcaklığının 230°C’ye çıkarılmasıyla, malzemenin viskozitesi azalarak yayılma özelliği artmakta bu da üretilen deney numunesinin boyutsal olarak genişlemesine neden olduğu düşünülmektedir. Nozul sıcaklığının artırılması katmanlar arası birleşimi iyileştirirken, boyutsal toleransları kontrol etmeyi zorlaştırdığı görülmektedir. Tarama stratejileri arasında nominal değere (25 mm) uyum bakımından farklılıklar bulunduğu gözlemlenmiştir. Octagram Spiral tarama stratejisi 210 °C, 220 °C ve 230 °C sıcaklıklarında nominal değer olan 25 mm çizgisine neredeyse tam uyum sağladığı görülmektedir. Bu tarama

stratejisi geometrik yolların dengeli dağılımını, termal gerilmelerin homojen yayılmasını sağlayarak boyutsal sapmaları minimize etmektedir. Ancak Rectilinear tarama stratejisi ile yapılan deneylerde 200 °C’de belirgin bir küçülme gösterirken, 230 °C’de nominal değerin üzerine çıktığı görülmektedir. C-D yüzeyleri arasında nominal mesafenin korunması açısından en başarılı kombinasyon 210 °C ve 220 °C nozul sıcaklıkları arasında Octagram Spiral tarama stratejisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda, nozul sıcaklığının, C-D yüzeyler arası mesafesi üzerindeki etkisi %60,39, tarama stratejisini ise %27,67 olduğu belirlenmiştir.

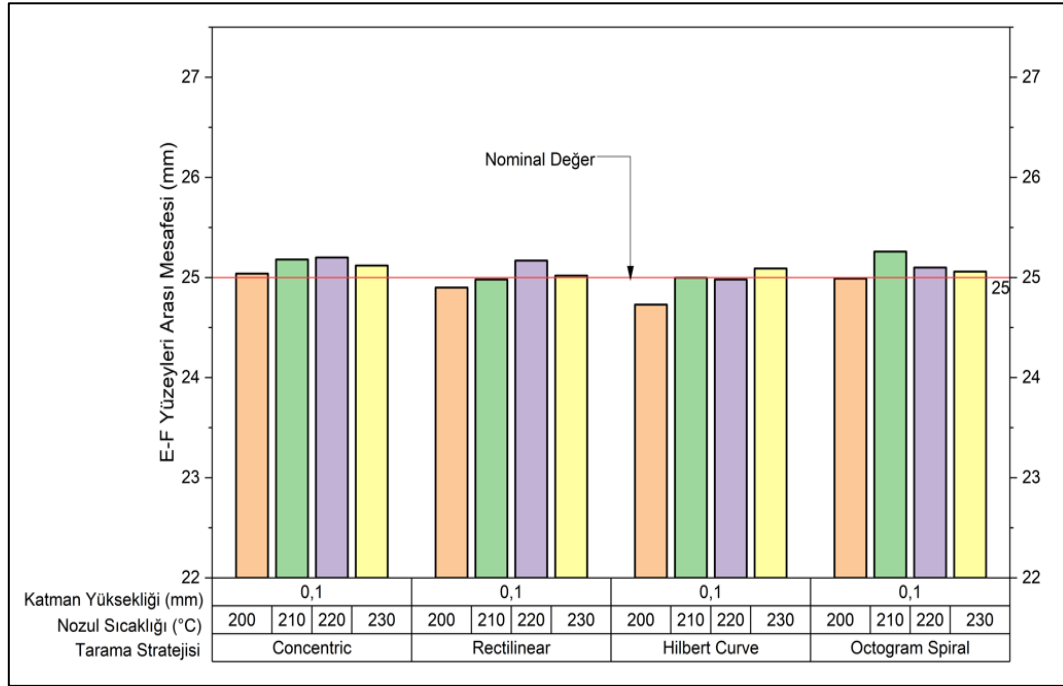


Şekil 8. Deney numunelerinin C-D yüzeyleri arasındaki mesafe (mm) sonuçları.

Üretim Parametrelerinin E-F Yüzeyleri Arasındaki Mesafe (mm) Üzerindeki Etkisi

FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinin boyutsal doğrulunu (E-F yüzeyleri arasındaki 25 mm nominal mesafe üzerinden) üretim parametrelerine bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 9’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde, özellikle 200 °C nozul sıcaklığında üretilen numunelerin çoğunlukla, nominal değer olan 25 mm’nin altında kaldığı görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda (200 °C) ekstrüde edilen PLA malzemesinin hızlı soğuması, katmalar arasındaki termal gerilmelerin artmasına, çekme miktarının yükselmesine neden olmuştur. Bu duruma ek olarak polimer zincirlerinin yeterince gevşemesine izin vermediği ayrıca boyutsal küçülmelere neden olduğu düşünülmektedir. Hilbert Curve tarama stratejisinde 200 °C nozul sıcaklığında üretilen deney numunesinde, E-F yüzeyleri arasındaki mesafe yaklaşık 24,7 mm ile nominal değere oranla en küçük değeri gösteren üretim parametresi olmuştur. Bu durum, tarama stratejisinin karmaşık yol geometrisinin düşük sıcaklıklarda zayıf akışkanlıkta birleştiği boyutsal bütünlüğü koruyamadığını göstermektedir. Nozul sıcaklığının 210 °C ve üzerine çıkarıldığında numunelerin E-F yüzeyleri arasındaki mesafenin nominal değeri aşma eğiliminde olduğu görülmektedir. Octagram Spiral tarama stratejinde 200 °C ve

230 °C nozul sıcaklıklarında nominal değer olan 25 mm çizgisine en yakın sonuçların elde edildiği ve boyutsal kararlılık sergilediği görülmektedir. Hassas üretim süreçlerinde E-F yüzeyleri arasındaki mesafenin korunması için Octagram Spiral tarama stratejisi, geniş bir nozul sıcaklığında en güvenilir sonuçlar vermiştir. Ancak Concentric tarama stratejisinde ise aşırı boyutlandırma veya ölçüden sapma görülmektedir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda, nozul sıcaklığının, E-F yüzeyler arası mesafesi üzerindeki etkisi %41,25, tarama stratejisini ise %33,8 olduğu belirlenmiştir.



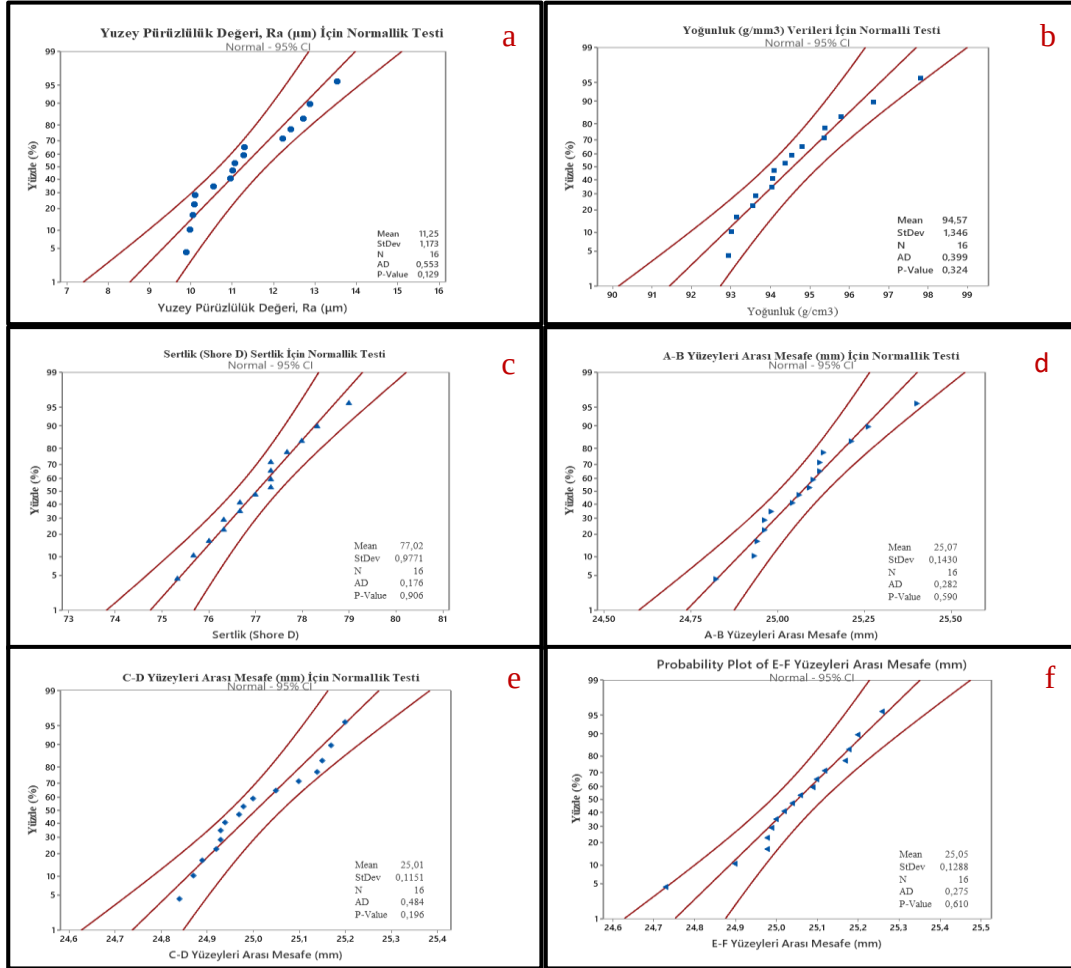
Şekil 9. Deney numunelerinin E-F yüzeyleri arasındaki mesafe (mm) sonuçları.

Üretim Parametrelerine Bağlı Olarak, Yüzey Pürüzlülük Değeri, Üretilen Malzeme Yoğunluğu, Üretilen Malzeme Sertliği ve Yüzeyleri Arası Mesafelerin Optimizasyonu

Olasılık Analizi

Yapılan çalışmada, üretim sürecine ait parametrelerin (katman yüksekliği, nozul sıcaklığı ve tarama stratejisi) çıktı değerleri üzerindeki etkilerinin istatistiksel anlamlılığı dair farklı yaklaşımlar bulunduğu bilinmektedir (Şahin vd., 2026, Işık, 2025). Yapmış olduğumuz çalışmada, üretim sonucunda elde edilen deneysel verilerin tesadüfi değişkenlerden arındırılmış olduğunu ve normal dağılım sergilediğini doğrulamak amacıyla, Anderson-Darling (AD) testi uygulanmıştır. Taguchi L16 ortogonal dizini ile gerçekleştirilen üretim deneylerinin, çıktı parametreleri (Tablo 2) için yapılan analiz sonuçları Şekil 3.8’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değeri, yoğunluk, sertlik ve yüzeyler arası mesafe için %95 güven aralığında (CI) oluşturulan grafikler (Şekil 10,) incelendiğinde; tüm veri noktalarının güven sınırları içerisinde ve merkezi eğilim çizgileri etrafında doğrusal bir dağılım sergilediği görülmektedir. İstatistiksel değerlendirme sonucunda yüzey pürüzlülük değeri, yoğunluk, sertlik ve yüzeyler arası mesafeleri için P-Value değerinin (sırasıyla 0,129, 0,324, 0,906, 0,590,

0,196 ve 0,610) 0,05 anlamlılık değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca AD değerlerinin kritik eşik değeri olan 0,752'nin altında olması, verilerin normal dağılım varsayımının tam olarak karşıladığını doğrulamaktadır. Elde edilen bu bulgular, deneysel sonuçların güvenilirliğini ve ileri seviye optimizasyon çalışmaları için uygunluğunu bilimsel olarak ortaya koyduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. a. Ra sonuçları için olasılık test grafiği, b. Yoğunluk sonuçları için olasılık test grafiği, c. Sertlik sonuçları için olasılık test grafiği, d. A-B yüzeyler arası mesafeleri için sonuçları için olasılık test grafiği, e. C-D yüzeyler arası mesafeleri için sonuçları için olasılık test grafiği, f. E-F yüzeyler arası mesafeleri için sonuçları için olasılık test grafiği, verilmiştir.

S/N (Sinyal/Gürültü) Oranını Analizi

FDM ile üretim süreçlerinde operasyonel performansın ve parça bütünlüğünün temel göstergeleri arasında yer alan yüzey pürüzlülük değeri, imal edilen parça yoğunluğu ve boyutsal hassasiyet, üretilen fonksiyonel ürünlerin kalitesini ve kullanım ömrünü doğrudan belirleyen kritik parametrelerdir. PLA (Polilaktik Asit) malzemenin termal davranışları ve katmanlı yapısı gereği; nozul sıcaklığı ve tarama stratejisi gibi işlem parametrelerinin bu çıktılar üzerindeki karmaşık etkilerini analiz etmek ve parça kalitesini maksimize etmek, üretim verimliliği açısından stratejik bir öneme sahiptir. Yapılan bu çalışmada hedeflenen optimum üretim şartlarını belirlemek amacıyla, çok

kriterli bir optimizasyon süreci yürütülmüştür. Analizlerde, yüzey pürüzlülük değeri (Ra) ve boyutsal sapmalar için “en küçük en iyidir” yaklaşımı, parça yoğunluğu ve sertlik değerleri için ise “en büyük en iyidir” yaklaşımı esas alınarak, Taguchi tabanlı bir değerlendirme yapılmıştır. Deneysel verilerin istatistiksel olarak anlamlandırılmasında kullanılan S/N (Sinyal/Gürültü) oranları, ilgili karakteristik fonksiyonlar aracılığıyla hesaplanmıştır. FDM (Eriyik Yığma Modelleme) yöntemiyle üretilen PLA numunelerinden elde edilen ölçüm sonuçları ve bunlara karşılık gelen S/N (Sinyal/Gürültü) oranları, ilgili karakteristik fonksiyonlar aracılığıyla hesaplanmıştır. FDM yöntemiyle üretilen PLA numunelerinden elde edilen ölçüm sonuçları ve bunlara karşılık gelen S/N değerleri Tablo 4 ve 5’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4. FDM yöntemiyle üretilen numuneler için Ra, ρ ve sertlik deney sonuçları ve S/N oranları.

Den. No	Ra (μm)	Ra-S/N (dB)	Yoğunluk (g/cm^3)	Yoğunluk -S/N (dB)	Sertlik (Shore D)	Sertlik -S/N (dB)
1	13,540	-22,6324	94,5329	39,5117	76,67	37,6925
2	12,420	-21,8824	94,0423	39,4665	76,00	37,6163
3	12,220	-21,7414	93,0057	39,3702	77,33	37,7670
4	12,870	-22,1916	92,9470	39,3647	75,33	37,5394
5	12,720	-22,0897	93,1489	39,3836	75,67	37,5785
6	10,550	-20,4650	95,3852	39,5896	76,33	37,6539
7	10,099	-20,0856	95,3574	39,5871	77,33	37,7670
8	11,300	-21,0616	94,0543	39,4676	76,67	37,6925
9	10,950	-20,7883	94,3676	39,4965	77,33	37,7670
10	10,050	-20,0433	97,7940	39,8062	76,33	37,6539
11	9,974	-19,9774	96,6038	39,6999	78,00	37,8419
12	9,887	-19,9013	94,8110	39,5372	77,33	37,7670
13	11,020	-20,8436	94,0996	39,4718	77,00	37,7298
14	11,270	-21,0385	93,6302	39,4283	77,67	37,8051
15	10,080	-20,0692	95,7877	39,6262	79,00	37,9525
16	11,060	-20,8751	93,5505	39,4209	78,33	37,8786
T _{Ra}	11,250 μm			T _{Ra-S/N}	-20,987 dB	
T _p	94,569 g/cm^3			T _{p-S/N}	39,204 dB	
T _{Sert.}	77,02 Shore D			T _{Sert-S/N}	37,721 dB	

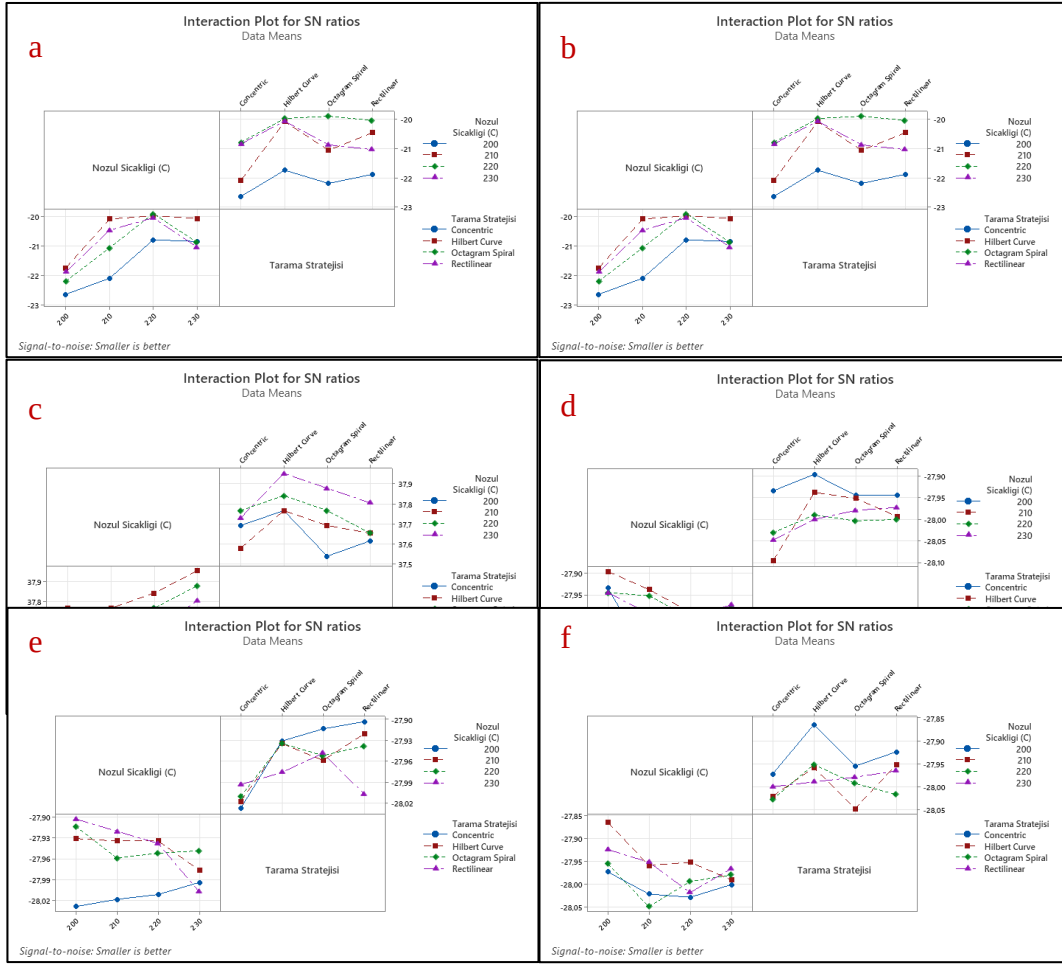
Tablo 5. FDM yöntemiyle üretilen numuneler için A-B, C-D ve E-F mesafelerinin deney sonuçları ve S/N oranları.

Den. No	A-B (mm)	A-B-S/N (dB)	C-D (mm)	C-D -S/N (dB)	E-F (mm)	E-F -S/N (dB)
1	24,93	-27,9344	25,20	-28,0280	25,04	-27,9727
2	24,96	-27,9449	24,84	-27,9030	24,90	-27,9240
3	24,82	-27,8960	24,92	-27,9310	24,73	-27,8645
4	24,96	-27,9449	24,87	-27,9135	24,99	-27,9553
5	25,40	-28,0967	25,17	-28,0177	25,18	-28,0211
6	25,10	-27,9935	24,89	-27,9205	24,98	-27,9518
7	24,94	-27,9379	24,93	-27,9344	25,00	-27,9588
8	24,98	-27,9518	25,00	-27,9588	25,26	-28,0487
9	25,21	-28,0315	25,15	-28,0108	25,20	-28,0280
10	25,12	-28,0004	24,94	-27,9379	25,17	-28,0177
11	25,09	-27,9900	24,93	-27,9344	24,98	-27,9518
12	25,13	-28,0038	24,98	-27,9518	25,10	-27,9935
13	25,26	-28,0487	25,10	-27,9935	25,12	-28,0004
14	25,04	-27,9727	25,14	-28,0073	25,02	-27,9657
15	25,12	-28,0004	25,05	-27,9762	25,09	-27,9900
16	25,06	-27,9796	24,97	-27,9484	25,06	-27,9796
T _{A-B}	125,070mm			T _{A-B-S/N}	-27,98 dB	
T _{C-D}	25,005mm			T _{C-D-S/N}	-27,96 dB	
T _{E-F}	25,051 mm			T _{E-F-S/N}	-27,976 dB	

Bu çalışmada, nozul çapı 0,4 mm, katman kalınlığı 0,1 mm ve doluluk oranı %100 sabit tutularak üretilen numunelerin boyutsal doğrulukları (A-B, C-D, E-F) ile mekanik ve yüzey özellikleri (sertlik, yoğunluk ve yüzey pürüzlülük değeri) Taguchi metodolojisi kullanılarak analiz edilmiş ve üretim parametreleri optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinde, boyutsal sapmalar ve yüzey pürüzlülük değeri için “en küçük en iyidir”, yapısal bütünlüğü ifade eden sertlik ve yoğunluk için ise “en büyük en iyidir” kalite karakteristiği esas alınmıştır. Kontrol faktörlerinin Ra, sertlik, yoğunluk, yüzeyler arası mesafeler üzerindeki bireysel etkilerini ve önem sıralarını belirtmek amacıyla oluşturulan S/N yanıt tablosu Tablo 6’da verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre boyutsal doğruluk açısından optimum parametre seviyeleri; A-B mesafesi için A1B2C1, C-D mesafesi için A2B4C1, E-F mesafesi için A2B3C1 tespit edilmiştir. Mekanik ve yüzey özellikleri değerlendirildiğinde ise; en yüksek sertlik değerine ulaşmak için optimum koşulların A4B4C1 kombinasyonunda olduğu görülmüştür. En yüksek yoğunluk ve en düşük yüzey pürüzlülük değerleri için ideal üretim parametreleri ise sırasıyla A2B2C1 ve A3B4C1 seviyeleri olarak belirlenmiştir. Şekil 11 (a,b,c,d,e ve f)’da S/N oranı grafikleri verilmiştir.

Tablo 6. Ra, ρ, Shore D, A-B, C-D ve E-F için S/N yanıt tablosu.

Seviye	Girdi Parametreleri					
	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tarama Stratejisi	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tarama Stratejisi	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tarama Stratejisi
	Ra		ρ		Shore D	
1	-22,11	-21,59	39,43	39,47	37,65	37,69
2	-20,93	-20,47	39,51	39,57	37,67	37,83
3	-20,18	-21,01	39,63	39,45	37,76	37,72
4	-20,71	-20,86	39,49	39,57	37,84	37,68
Delta	1,93	1,12	0,21	0,13	0,19	0,15
Toplam	1	2	1	2	1	2
	A-B		C-D		E-F	
1	-27,93	-28,03	-27,94	-28,01	-27,93	-28,01
2	-27,99	-27,96	-27,96	-27,94	-28,00	-27,94
3	-28,01	-27,97	-27,96	-27,94	-28,00	-27,99
4	-28,00	-27,98	-27,98	-27,94	-27,98	-27,96
Delta	0,08	0,07	0,04	0,07	0,07	0,06
Toplam	1	2	2	1	1	2



Şekil 11. a. Yüzey pürüzlülük değeri için ortalama S/N oranları grafiği, b. Yoğunluk için ortalama S/N oranları grafiği, c. Sertlik değeri için ortalama S/N oranları grafiği, d. A-B yüzeyler arası mesafesi için ortalama S/N oranları grafiği, e. C-D yüzeyler arası mesafesi için ortalama S/N oranları grafiği, f. E-F yüzeyler arası mesafesi için ortalama S/N oranları grafiği, verilmiştir.

İşleme Parametreleri için Varyans Analizi (ANOVA)

Taguchi L16 ortogonal dizisine göre kurgulanan Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM) yöntemiyle üretilen deney numunelerinde; nozul sıcaklığı ve tarama stratejisinin yüzey pürüzlülük değeri (R_a), üretilen numune yoğunluğu (p), sertlik (Shore D) ile A-B, C-D ve E-F yüzeyleri arasındaki mesafeleri belirlemek amacıyla %95 güven aralığında Varyans Analizi (ANOVA) uygulanmıştır (Nas, vd., 2022). Analiz sonuçları Tablo 6’da detaylı olarak verilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde R_a üzerinde %68,23 katkı oranıyla nozul sıcaklığının en baskın faktör olduğu, bunu %21,63 ile tarama stratejisinin izlediği belirlenmiştir. Hem nozul sıcaklığının hem de tarama stratejisinin istatistiksel olarak anlamlılık sınırının altında kalması, girdi parametrelerinin yüzey kalitesi üzerinde doğrudan ve yüksek düzeyde bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedir. Modelin hata payının %10,13 olması ise kurulan istatistiksel modelin deneysel verileri yüksek

yoğunlukta doğrulukla temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Fiziksel ve mekanik özellikler incelendiğinde parametrelerin daha kararlı bir eğilim sunduğu saptanmıştır. Üretilen numunelerin yoğunluğu üzerinde nozul sıcaklığı %33,65, tarama stratejisi %7,93 oranında, sertlik üzerinde ise nozul sıcaklığı %23,38, tarama stratejisi %20,34 oranında etki payına sahip olduğu görülmektedir. Modellerdeki yüksek hata payları (yoğunluk için %58,41, sertlik için %56,28), kontrol faktörlerinden ziyade cihaz/ölçüm hassasiyeti ile ortam koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Boyutsal hassasiyet analizlerinde ise parça geometrisinin katman bazlı soğuma dinamiklerine bağlı olarak ekstenel farklılıklar tespit edilmiştir. A-B yüzeyleri arasındaki boyutsal sapmalarda nozul sıcaklığının %29,31, tarama stratejisi %12,23 oranında katkı sunarken, C-D yüzeyleri arasında nozul sıcaklığı %29,33, tarama stratejisi %23,04 oranında etki göstermiştir. E-F yüzeyleri arasındaki mesafede ise nozul sıcaklığının %41,25, tarama stratejisi ise %33,82 oranında katkı sağladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, FDM parametrelerinden nozul sıcaklığının, üretilen deney numunelerinin yüzey kalitesi (Ra) ile boyutsal hassasiyet dinamikleri üzerindeki birincil derecede kritik bir öneme sahip olduğu, tarama stratejisinin ise bu çıktılarda ikinci önemli kontrol faktörü olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. Çıktı Değişkenleri için ANOVA analiz sonuçları.

Çıktı Değişkeni	Kontrol Faktörü	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Yüzey Pürüzlülük Değeri (Ra)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	14,077	4,6924	20,20	0,000	68,23
	Tarama Stratejisi	3	4,463	1,4876	6,40	0,013	21,63
	Hata	9	2,091	-	-	-	10,13
	Toplam	15	20,631	-	-	-	100
Yoğunluk (ρ)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	10,927	3,642	3,34	0,070	40,19
	Tarama Stratejisi	3	6,447	2,149	1,97	0,189	23,71
	Hata	9	9,812	1,090	-	-	36,09
	Toplam	15	27,187	-	-	-	100
Sertlik (Shore D)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	7,021	2,3403	7,55	0,008	49,03
	Tarama Stratejisi	3	4,511	1,5036	4,85	0,028	31,50
	Hata	9	2,789	0,3099	-	-	19,47
	Toplam	15	14,320	-	-	-	2,789
A-B Yüzeyleri Arası Mesafe(mm)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	0,12615	0,042050	4,59	0,033	41,12
	Tarama Stratejisi	3	0,09815	0,032717	3,57	0,060	31,99
	Hata	9	0,08250	0,009167	-	-	26,89
	Toplam	15	0,30680	-	-	-	100
C-D Yüzeyleri Arası Mesafe(mm)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	0,23375	0,007917	1,30	0,334	11,95
	Tarama Stratejisi	3	0,12005	0,040017	6,55	0,012	60,39
	Hata	9	0,05500	0,006111	-	-	27,67
	Toplam	15	0,19880	-	-	-	100
E-F Yüzeyleri Arası Mesafe(mm)	Nozul Sıcaklığı (°C)	3	0,10263	0,034208	4,96	0,027	41,25
	Tarama Stratejisi	3	0,08412	0,028042	4,07	0,044	33,82
	Hata	9	0,06203	0,006892	-	-	24,93
	Toplam	15	0,24878	-	-	-	100

Tartışma ve Sonuç

Yapılan deneysel çalışmalar ve grafiksel analizler sonucunda, nozul sıcaklığı ve tarama stratejisinin PLA malzemesinden üretilen deney numunelerinin fiziksel, mekanik ve çevresel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılarak, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Nozul sıcaklığının 200 °C'den 230 °C'ye çıkarılması, malzemenin reolojik özelliklerini iyileştirerek katmanlar arası difüzyonu ve moleküler arası bağ enerjisini artırdığı düşünülmektedir.
- Yüzeyler arası nominal değerin (25 mm) üzerinde yapılan ölçümlerde, boyutsal doğruluğun nozul sıcaklığına ve tarama stratejisine bağlı olarak büzülme veya genleşme eğilimi göstermiştir.
- Karbon emisyonu değerlerinin hem sıcaklık hem de tarama stratejilerinden doğrudan etkilenmiştir.
- Üretilen deney numunelerinde, mekanik direnç ve sertlik için 220 °C ve 230 °C nozul sıcaklığında, Hilbert Curve tarama stratejisinin en ideal üretim parametresi olduğu görülmüştür.
- Hassas geometrik toleranslar için 210 °C ve 220 °C nozul sıcaklığında Octagram Spiral tarama stratejisinin en ideal üretim parametresi olduğu belirlenmiştir.
- Çevresel sürdürülebilirlik için ise Rectilinear tarama stratejisinin tercih edilmesi sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- Adanur, Ö., Koçar, O., & Güldibi, A. S. (2024). FDM yöntemiyle üretilen PLA malzemelerde dolgu deseninin mekanik özelliklere etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 294-307. doi:10.35193/bseufbd.1336572
- Aydın, K., Özlü, B., & Uğur, L. (2025). Investigation of machining performance of Ti6Al4V alloy in face milling process considering the energy consumption and carbon emission. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s13369-025-10850-2>
- Batu, T., Lemu, H. G., Shimels, H. G., & Zebeay, M. (2023). Process parameter modelling and optimization techniques applied to fused deposition modelling: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1294(1), 012047. doi:10.1088/1757-899X/1294/1/012047
- Benali, N., Alshahrani, H., & De Barros, S. (2026). FDM yöntemiyle mantar yüzey üzerinde PLA'nın yapışma özelliklerinin optimizasyonu: Bir Taguchi deney tasarımı. *Uluslararası Yapışma ve Yapıştırıcılar Dergisi*, 104278. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2026.104278>
- Caputo, M., Rashwan, O., Waryoba, D., & McDade, K. (2022). Ekstrüde edilmiş ve ütülenmiş polilaktik asit malzemenin yüzey dokusu ve termo-mekanik özellikleri. *Katmanlı Üretim*, 59, 103084. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103084>
- Golhin, A. P., Tonello, R., Frisvad, J. R., Grammatikos, S., & Strandlie, A. (2023). Surface roughness of as-printed polymers: A comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(3), 987-1043. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11566-z>
- Işık, U. (2025). *Eklemeli imalat yöntemi ile farklı parametrelerde üretilen AlSi10Mg parçalarının mekanik özelliklerinin ve işlenebilirliğinin değerlendirilmesi* (Doktora tezi). Karabük Üniversitesi, Karabük.

- Kartal, F. (2018). Examination of tensile test specimens produced in three dimensional printer. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(3), 30-36.
- Kumar, K., & Singh, H. (2023). Multi-objective optimization of fused deposition modeling for mechanical properties of biopolymer parts using the Grey-Taguchi method. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00847-z>
- Kuruoğlu, Y., Akgün, M., & Demir, H. (2022). FDM yöntemiyle üretilen ABS, PLA ve PETG numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve çekme dayanımının modellenmesi ve optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(3), 358-369. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923>
- Nas, E. (2024). Experimental and statistical investigation of electro-erosion machining performance of cryogenic treated hardened AISI H13 hot work tool steel. *Tribology International*, 193, 109453. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109453>
- Nas, E., & Kara, F. (2022). Hastelloy C22 süper alaşımlarının EDM işlenebilirliğinin optimizasyonu. *Makineler*, 10 (12),1131.<https://doi.org/10.3390/machines10121131>
- Patel, K., Acharya, S., & Acharya, G. D. (2024). Taguchi grey relational analysis for multi-objective FDM parameter optimization of PLA components. *Jurnal Kejuruteraan*, 36(3), 1155-1165. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(3\)-26](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(3)-26)
- Pinar, A. M., Ergene, B., Atlıhan, G., Mağatlı, A. A., Kaya, F., Karahan, B., & Nişancı, M. E. (2023). Statistical evaluation of the screw pull out forces of PLA parts manufactured by fused deposition modeling. *Gazi Journal of Engineering Sciences*, 9(2), 310-321. doi:10.30855/gmbd.0705073
- Priyamal, M. G. U. K., Ranasinghe, H. D., Fernando, W. R., & Kulatunga, A. K. (2024). Kaynaklı biriktirme modelleme 3B yönteminin çevresel sürdürülebilirliğinin deneysel değerlendirilmesi. *Sürdürülebilir Üretim Küresel Konferansı* içinde (s. 486-493). Springer Nature Switzerland.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., & Letcher, T. (2016). Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3), 467-481. doi:10.1007/s11668-016-0113-2
- Sağbaş, B. (2018). Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 6(4), 1028-1037.
- Singh, S. (2025). Machine learning-based prediction of surface roughness in fused deposition modeling using multi-parameter process data. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 9(12), 1-6. <https://doi.org/10.55041/IJSREM55039>
- Şahin, A., Özlü, B., Demir, H., & Gündüz, S. (2026). SLM parametrelerinin CoCrMo dış alaşımlarının yüzey kalitesi, geometrik toleransları, mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi ve optimizasyonu. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/09544062251413454>
- Tiwari, A. S., & Yang, S. (2023). Energy consumption modeling of 3D-printed carbon-fiber-reinforced polymer parts. *Polymers*, 15(5), 1290. <https://doi.org/10.3390/polym15051290>
- Toprak, İ. B. (2024). Eriyik yığılma modelleme süreç parametrelerinin Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çoklu yanıt optimizasyonu. *Manufacturing Technologies and Applications*, 5(2), 89-103. <https://doi.org/10.52795/mateca.1499800>
- Vidakis, N., Kechagias, J. D., Petousis, M., Vakouftsi, F., & Mountakis, N. (2023). The effects of FFF 3D printing parameters on energy consumption. *Materials and Manufacturing Processes*, 38(8), 915-932. <https://doi.org/10.1080/10426914.2022.2105882>

- Yanar, F. N., & Kartal, Y. (2026). Yüksek mekanik özellikler ve boyutsal doğruluk temelli yaklaşımın eklemeli imalat yönteminde Taguchi metodu ile optimizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 190-199. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1708300>